



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA



CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE

CIEMA - UNI

**COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO FILTER PARA
LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS CON CONCENTRACIONES
DE 60 µg/L A 80 µg/L EN LA COMUNIDAD DE LINDA VISTA DEL
MUNICIPIO DE SANTA ROSA DEL PEÑÓN**

Tesis sometida a la consideración del Centro de Investigación y Estudios en Medio
Ambiente para optar al título de Maestro en Ingeniería Ambiental

Tesista: Ing. Rolando Benito Castillo

Tutor: MSc. Lic. Rodolfo Jaén Serrano

Asesor: MSc. Ing. Edouard Jacotin

Managua, Nicaragua, Junio 2011

DEDICATORIA

A Dios nuestro señor por permitirme hasta el día de hoy estar bajo su amor y voluntad.

A mi esposa Jackeline Sandino Selva y mis hijos Ninoska de los Angeles Castillo Sandino y Rolando Antonio Castillo Sandino que siempre llenan de felicidad mi entorno y me inspiran valor para seguir adelante.

A mis padres y hermanos, agradeciéndoles su estímulo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer a todas aquellas personas e instituciones que de alguna u otra manera contribuyeron en la realización de este estudio de tesis.

Con especial reconocimiento a:

Al Centro de Investigación y Estudio en Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (CIEMA - UNI), a través de su director MSc. Ingeniero Sergio Gámez, al darnos su apoyo logístico en la realización de este estudio.

Al Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), por financiar el presente trabajo de investigación.

MSc. Licenciado Rodolfo Jaén del CIEMA-UNI, tutor de nuestro estudio, quien nos guió a lo largo de este tiempo con sus comentarios y sugerencias por contribuir positivamente en la culminación de este trabajo.

A todas las personas que de una u otra forma nos ayudaron en la realización de este trabajo investigativo.

Managua, Nicaragua
13 de Febrero del 2009

Ingeniero
Edouard Jacotin
Coordinador Maestría Ingeniería Ambiental
UNI / CIEMA
Sus Manos

Estimado Ingeniero Jacotin:

Por medio de la presente someto a aprobación de la UNI / CIEMA el Protocolo de Tesis para optar al Título de Maestro en Ingeniería Ambiental el cual tiene el nombre de **"Comportamiento de tecnología KANCHAN y SONO FILTERS para la remoción de arsénico con concentraciones de 60 a 80 $\mu\text{g/l}$, en la comunidad de Linda Vista del Municipio de Santa Rosa del Peñón"**. Para que de esta manera poder iniciar el proceso de implementación de dicho estudio y cumplir con las exigencias académicas estipuladas en el reglamento de Maestría.

Para llevar a cabo el presente estudio estoy proponiendo la Tutoría del Msc. Rodolfo Jaén Serrano y el Asesoramiento del Msc. Eduardo Jacotin, por lo que también solicito su aprobación.

Esperando una respuesta pronta al respecto.

Atentamente,


Rolando Benito Castillo
Estudiante/Maestría Ingeniería Ambiental
Ciclo Académico 2004-2005

cc. Sergio Gámez
Sagrario Espinal
Rodolfo Jaenz
Archivo

Director CIEMA
Secretaría Académica CIEMA
Profesor de Maestría Ingeniería Ambiental





Managua, 20 de Marzo de 2009

Ing. Rolando Castillo.

Egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental

Estimado Ing. Castillo

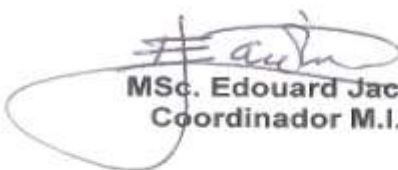
Acusamos recepción del protocolo de tesis metodológicamente revisado y aprobado.

En base a acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA en donde se analizó y aprobó la última revisión efectuada por el comité científico escogido y convocado por el mencionado Consejo. Conforme al Título III. Art. 10 del Reglamento Académico referente a los derechos de elaboraciones de tesis y Título III. Art. 11 del Reglamento de Culminación de Estudios de las Maestrías referente a los pasos a seguir para ser aceptado un protocolo de tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental (MIA), se hace constar que el contenido de dicho protocolo titulado **"Comportamiento de Tecnología KAMCHAN Y SONO FILTERS en la comunidad Santa Rosa del Peñón"** ofrece calidad y criterios coherentes al objetivo del mismo tema, para ser desarrollado, como tesis que le habilitará a optar, una vez elaborado, revisada y defendida, al grado de Magíster en Ingeniería Ambiental.

En base a la misma Acta 02-2009 del Consejo Académico del CIEMA se acordó que el tutor idóneo para acompañarle en la elaboración de dicha tesis será el MSc. Rodolfo Jaén Serrano.

Sin más a que referirme me despido de usted.

Atentamente,


MSc. Edouard Jacotin
Coordinador M.I.A.



C/c. MSc. Sergio Gámez
MSc. Rodolfo Jaén.
MSc. Sagrario Espinal
Archivo

Director CIEMA
Tutor de la tesis
Secretaría Académica CIEMA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

**Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente
(CIEMA - UNI)**



Managua, 3 de agosto de 2010.

Ing. Rolando Benito Castillo

Egresado de la Maestría de Ingeniería Ambiental

Estimado Ing. Castillo

Por medio de la presente tengo a bien informarle que el Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente (CIEMA) ha nombrado el jurado para la defensa de tesis titulada "COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO FILTER PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS CON CONCENTRACIONES ENTRE 60µg/L-80µg/L, EN LA COMUNIDAD DE LINDA VISTA DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DEL PEÑON" para optar al Título de Maestro en Ingeniería Ambiental que otorga la Universidad Nacional de Ingeniería.

El Jurado está conformado por las personas siguientes:

MSc. Miguel Balladares

MSc. Edouardo Ortiz

Dra. Teresa Rodríguez

Agradeciéndole de antemano la atención a la presente y deseándole éxitos. Me suscribo.

Atentamente


MSc. Edouard Jacotin
Coordinador de Maestría Ingeniería Ambiental

Cc/MSc. Sergio Gámez

MSc. Sagrario Espinal

Archivo

Director CIEMA

Secretaría Académica



Managua, 19 de Mayo de 2011

MSc. Ing. Yalena Navarro
Coordinadora Maestría en Ingeniería Ambiental
PIENSA - UNI
Su Despacho.-

Estimada MSc. Ing. Navarro

Me es grato dirigirme a usted, con el propósito de informarle que el egresado de la Maestría en Ingeniería Ambiental, Ing. Rolando Benito Castillo, ha incorporado las recomendaciones que hicieron los miembros del jurado examinador, previa revisión minuciosa de informe de tesis, denominada **"COMPORTAMIENTO DE TECNOLOGÍA KANCHAN Y SONO FILTER PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS CON CONCENTRACIONES DE 60 µg/L A 80 µg/L EN LA COMUNIDAD DE LINDA VISTA DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA DEL PEÑÓN"**.

Lo anterior ha sido corroborado por los miembros del jurado examinador, quienes comprobaron la incorporación de las observaciones realizadas al informe de tesis elaborado por el Ing. Rolando Castillo, el cual también revisé y confirmé las mejoras efectuadas, por lo que estoy solicitándole el establecimiento de fecha de defensa, según lo define el Reglamento de Culminación de Estudios de Maestrías.

He de recordarle que el jurado examinador está constituido por los especialistas siguientes:

MSc. Ing. Miguel Balladares
Ing. Eduardo Ortiz
Dra. Teresa Rodríguez Altamirano

Sin más a que referirme, aprovecho la oportunidad para saludarle y desearle éxitos en sus labores.

Atentamente



MSc. Lic. Rodolfo Manuel Jaen Serrano
Profesor Tutor de Tesista

Cc. MSc. Lic. Sagrario Espinal; Secretaria Académica PIENSA - UNI
Ing. Rolando Benito Castillo; optante al Título de Maestría en Ingeniería Ambiental
Expediente estudiante Ing. Rolando Benito Castillo
Arch. MSc. Lic. Rodolfo Manuel Jaen Serrano; Tutor



Managua, 01 de julio de 2011

Ing. Rolando Benito Castillo
Maestro en Ingeniería Ambiental
Ciclo académico 2004-2005
Sus manos.-

Estimado MSc. Ingeniero Castillo,

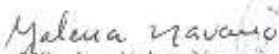
Gracias por su carta de fecha 30 de junio de 2011 remitiendo la versión electrónica de su tesis, defendida el 16 de junio de 2011, titulada: **"Comportamiento de tecnología KANCHAN Y ZONA FILTERS para la remoción de Arsénico con concentraciones de 60-80 µg/L, en comunidad de Linda Vista de Santa Rosa del Peñón"**.

Se ha confirmado la incorporación de las recomendaciones del tribunal evaluador, según se registra en el Acta de Defensa No. 34, y por consiguiente se le autoriza para continuar con los lineamientos establecidos en el artículo 21 del capítulo IV del Reglamento Culminación de Estudios de Maestrías: *"El estudiante deberá entregar a la Coordinación de Maestría seis (6) ejemplares, debidamente empastados, del Trabajo de Tesis, una copia electrónica del mismo, y un artículo del Trabajo de Tesis para su posterior publicación y divulgación en los medios que el CIEMA seleccione"*.

Permítame aclararle que por instrucciones de la Secretaría Académica del CIEMA el total de ejemplares de su Trabajo de Tesis que debe entregar es 3 en lugar de 6.

Adjunto hago entrega del CD que fuese proporcionado por su persona para la verificación de la incorporación de las recomendaciones del Acta No. 34.

Atentos saludos,


MSc. Ing. Yalena Navarro
Maestría en Ingeniería Ambiental



cc: MSc. Lic. Sagrario Espinales - Secretaría Académica
Expediente Académico del estudiante
Archivo

RESUMEN DE LA INVESTIGACION

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de arsénico total, utilizando dos tecnologías de uso domiciliario como son el filtro KANCHAN y SONO filter, con agua de pozo que presentó valores de arsénico total entre 60µg/L y 80µg/L. La operación de los filtros duró aproximadamente cuatro meses y fueron instalados en el CIEMA – UNI para facilitar el trabajo y análisis de las variables de estudio. La filtración se dividió en ciclos. En el caso del filtro KANCHAN, se realizaron tres ciclos de filtración de 10L, 20L y 30L de agua diario en espacios de tiempos de 42, 17 y 17 días, para el SONO filter, se realizó solamente un ciclo de filtración, durante este ciclo se filtraron 10 litros de agua diariamente por un espacio de tiempo de 32 días. El filtro KANCHAN, presentó valores muy altos de remoción de arsénico, en cada uno de los ciclos de filtración la eliminación de arsénico fue de (73.8, 73.3 y 77.1) µg/L equivalente a (95.8, 97.2 y 97.0) % de remoción. Con estas eficiencias altas de remoción de arsénico en el agua filtrada durante estos ciclos de filtración, se logró que la concentración de arsénico en el agua estuviera dentro de lo establecido por la norma CAPRE que estipulan un valor máximo de arsénico de 10 µg/L. La turbiedad del agua filtrada en los diferentes ciclos de filtración fueron de 0.10 NTU, 0.06 NTU y 0.06NTU, cumpliendo con las normas CAPRE, la cual tiene como valor límite permisible 5 NTU. El análisis de hierro total en el agua filtrada registró un valor de 0.041mg/L, muy por debajo de la norma CAPRE que estipula un valor máximo de 0.3 mg/L. El SONO filter presentó valores muy pobres de eliminación de arsénico, la remoción de arsénico total fue de 35.3 µg/L lo que equivale a un 42.6% de remoción. Con esta eficiencia baja de remoción de arsénico en el efluente durante este ciclo de filtración no se alcanzó los valores de la norma CAPRE.

INDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCION.	1
1.1. Justificación.	2
1.2. Hipótesis.	3
1.3. Objetivos.	4
1.3.1. Objetivo General.	4
1.3.2. Objetivos Específicos.	4
II. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.	5
2.1. Arsénico en el agua.	5
2.1.1. Especiación del arsénico.	7
2.1.2. Distribución del arsénico.	7
2.2. Toxicidad del arsénico.	9
2.3. Proceso de tratamiento de arsénico.	11
2.4. Técnica de remoción de Arsénico	13
2.5. Remoción de arsénico a base de hierro.	13
2.5.1. Influencia del hierro natural.	15
2.5.2. Influencia de los fosfatos.	15
2.5.3. La corrosión del hierro.	16
2.6. Filtración lenta de arena.	17
2.6.1. Mecanismo de transporte.	18
2.6.2. Mecanismo de adherencia.	20
2.6.3. Mecanismo biológico.	21
2.6.4. Pérdida de carga.	22
2.7. Tecnologías domiciliar para remover arsénico.	22
2.7.1. Características del filtro KANCHAN.	22
2.7.1.1 . Remoción de arsénico.	24
2.7.1.2. Remoción de Patógenos.	24
2.7.1.3. Remoción de hierro y turbiedad.	25
2.7.1.4. Tasa de filtración.	26
2.7.1.5. Mecanismo de filtración lenta en la remoción de arsénico.	26

2.7.2.	SONO filter.	28
2.7.2.1.	Materiales y funciones características.	29
2.7.2.2.	Mecanismo de remoción del arsénico.	31
2.7.2.3.	Remoción de otros elementos en el agua.	33
2.8.	Origen de la contaminación con arsénico en Nicaragua.	33
2.9.	Tecnología utilizada para la detección de arsénico.	36
III.	DISEÑO METODOLOGICO.	40
3.1.	Área de estudio.	40
3.2.	Programa de trabajo.	40
3.3.	Modelos experimentales.	42
3.3.1.	Filtro KANCHAN.	43
3.3.2.	SONO filter.	44
3.4.	Método Experimental.	45
3.4.1.	Configuración de los filtros.	46
3.4.1.1.	Unidad principal.	46
3.4.1.2.	Sección de adsorción de arsénico.	47
3.4.1.3.	Tiempo de contacto.	48
3.4.1.4.	Sección de filtración lenta.	50
3.4.2.	Construcción de los filtros.	54
3.4.2.1.	Accesorios de PVC.	54
3.4.2.2.	Oxidación de los clavos.	55
3.4.2.3.	Procedimiento de construcción.	55
3.5.	Operación de los filtros.	60
3.5.1.	Fuente de agua contaminada con arsénico.	60
3.5.2.	Ciclo de filtración.	60
3.5.3.	Variables de estudio.	61
3.5.4.	Parámetros de control de calidad de agua.	62
3.5.5.	Método de análisis de laboratorio.	64
IV.	RESULTADOS	70
4.1.	Especiación del arsénico en el agua de pozo.	70

4.2.	Eficiencia de los filtros en la remoción de arsénico. -----	73
4.2.1.	SONO filter. -----	74
4.2.2.	Filtro KANCHAN. -----	78
4.3.	Análisis e interpretación de los resultados.-----	91
4.3.1.	SONO filter. -----	91
4.3.2.	Filtro KANCHAN. -----	93
4.4.	Limitaciones del estudio. -----	95
V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. -----	97
5.1.	Conclusiones.-----	97
5.2.	Recomendaciones. -----	99
VI.	BIBLIOGRAFIA. -----	102
VII.	ANEXOS -----	106
	Anexo A – Resultados del análisis granulométrico de la arena. -----	106
	Anexo B – Análisis físico químico del agua en estudio. -----	110
	Anexo C – Resultados experimentales del SONO filter y KANCHAN.-----	112
	Anexo D – Análisis de hierro total agua filtrada - Filtro KANCHAN. -----	116
	Anexo E – Galería de fotos. -----	117
	Anexo F – Presupuesto y planos constructivos SONO filter y KANCHAN -----	120

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución en el agua de las especies de arsénico en función de pH-Eh. (Lillo Javier, 2005).	8
Figura 2. Diagrama de pH para arsénico (V). (Tomado de Vu <i>et al</i> , 2003).	9
Figura 3. Distribución de las especies de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Petkova <i>et al</i> , 1997).	14
Figura 4. Movilidad de arsénico en presencia de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Petkova <i>et al</i> , 1997).	14
Figura 5. Profundidad de la capa de arena vs. Concentración de hierro (%) y concentración de arsénico (ppm). (Tomado de Ghimire, 2005).	27
Figura 6. Relación de la altitud del nivel de agua y la conductividad eléctrica (Tomado de UNICEF, 2004).	35
Figura 7. Especies de arsénico presente en la zona de El Charco y Santa Rosa del Peñón. (Tomado de UNICEF, 2004).	36
Figura 8. El Wagtech Arsenator. Tomado de http://www.wagtech.co.uk/products/water-and-environmental/water-test-kits/arsenator	39
Figura 9. Componentes del filtro KANCHAN. (Adaptado de Construction, Installation, Operation and Troubleshooting of KANCHAN TM Arsenic Filter (KAF) Gem505 Version).	44
Figura 10. Diagrama del SONO filter, Modelo SF – TWIN, Patente 1003935, 2002. (Tomado de Hussam nd Munir, 2007).	45
Figura 11. Especie de arsénico, pozo de Linda Vista - Santa Rosa del Peñón.....	71
Figura 12. Comportamiento semanal de la concentración de arsénico en agua de pozo.	72
Figura 13. Concentración de arsénico total agua cruda y filtrada SONO filter (Primer Ciclo)	75
Figura 14. Concentración de arsénico agua filtrada con SONO filter (Primer Ciclo).....	75
Figura 15. Tasa de filtración del SONO filter (Primer Ciclo)	76
Figura 16. Turbiedad del Agua filtrada - SONO filter (Primer Ciclo)	77
Figura 17. Promedio de Turbiedad Agua Filtrada - SONO filter (Primer Ciclo).....	78

Figura 18. Concentración de arsénico total agua cruda y filtrada - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).....	79
Figura 19. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)	80
Figura 20. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Primer Ciclo).....	81
Figura 21. Turbiedad del agua filtrada – Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)	82
Figura 22. Promedio de turbiedad Agua filtrada – Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)	82
Figura 23. Concentración de arsénico agua cruda y filtrada con Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).....	83
Figura 24. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)	84
Figura 25. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)	85
Figura 26. Turbiedad del Agua filtrada - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).....	86
Figura 27. Promedio de turbiedad agua filtrada – Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)	86
Figura 28. Concentración de arsénico agua cruda y filtrada con Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)	87
Figura 29. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)	88
Figura 30. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)	89
Figura 31. Turbiedad del agua filtrada – Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).....	90
Figura 32. Promedio de turbiedad agua filtrada – Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).....	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estabilidad y predominio de las especies de arsénico variando los rangos de pH en el medio acuático.	6
Tabla 2. Límites y valores guías de arsénico para Agua de Bebida según distintos organismos.	11
Tabla 3. Especificaciones generales de los materiales usados en SONO Filter, función y construcción.	29
Tabla 4. Posibles reacciones fisicoquímicas en diferentes partes del proceso de filtración en el SONO filter.	32
Tabla 5. Coeficiente de correlación parámetros fisicoquímicos en El Charco y Santa Rosa del Peñón. (Tomado de UNICEF, 2004).	34
Tabla 6. Dimensiones del balde KANCHAN.	46
Tabla 7. Dimensiones de los baldes del SONO filter.	47
Tabla 8. Dimensiones de la Pana.	47
Tabla 9. Ensaye Granulométrico de la Arena de Cauce Momotombo.	52
Tabla 10. Arreglo del filtro KANCHAN.	57
Tabla 11. Arreglo del Filtro SONO filter.	59
Tabla 12. pH y Potencial Redox muestra de agua cruda de pozo.	70
Tabla 13. Valores de arsénico total en agua de pozo.	72
Tabla 14. Parámetro de agua de pozo.	73
Tabla 15. Concentración de hierro y fosfato en agua de pozo.	73
Tabla 16. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - SONO filter (Primer Ciclo).	74
Tabla 17. Tasa de filtración (L/h) - SONO filter (Primer Ciclo).	76
Tabla 18. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - SONO filter (Primer Ciclo).	77
Tabla 19. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).	79
Tabla 20. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).	80
Tabla 21. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).	81
Tabla 22. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).	83
Tabla 23. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).	84
Tabla 24. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).	85
Tabla 25. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).	87

Tabla 26. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).....	88
Tabla 27. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).....	89
Tabla 28. Concentración de Hierro Total en Agua Cruda y Filtrada - Filtro KANCHAN ..	91

I. INTRODUCCION.

El arsénico es un contaminante que se puede encontrar en el agua, principalmente, por causas naturales, su presencia en aguas superficiales y subterráneas está asociada al volcanismo cuaternario y a actividades mineras, (Torres *et al*, 2006).

Las principales rutas de exposición del ser humano al arsénico son la ingesta y la inhalación, siendo acumulable este elemento en el organismo por exposición crónica. A ciertas concentraciones el arsénico ocasiona afecciones como: alteraciones de la piel, efectos secundarios en el sistema nervioso, irritación de los órganos del aparato respiratorio, gastro-intestinal y acumulación en los huesos, músculos y piel, y en menor grado en el hígado y riñones, (Castro de Esparza M.L CEPIS/OPS, 2004).

La ingesta de agua con alto contenido de arsénico, superior al máximo señalado por los criterios de potabilidad, puede dar lugar a una afección llamada hidroarsenicismo crónico, caracterizada por trastornos cutáneos, progresivos que pueden coexistir con otras lesiones extra-cutáneas no cancerígenas o bien lesiones cancerígenas viscerales, (Astolfi *et al*, 1981).

En el presente estudio se evaluó el comportamiento de dos tecnologías de remoción de arsénico conocidos como KANCHAN y SONO filter en aguas subterráneas que presentan concentraciones de 60 µg/L a 80 µg/L de arsénico total. La aplicación de las tecnologías conocidas como KANCHAN y SONO filter, tienen muy buena aceptación por su efectividad, sencillez de uso y bajo costos y se han implementado en países como Bangladesh y Nepal.

Durante la visita de reconocimiento realizada el día 16 de agosto del año 2008, en la comunidad de Linda Vista, se tomó una muestra de agua del pozo público y se realizó n análisis de arsénico total, con un quipo de medición portátil llamado ARSEATOR marca Wagtech, propiedad del CIEMA – UNI, el agua cruda presentó un valor de arsénico total de 73 µg/L que supera el valor permisible de agua para consumo humano.

En Nicaragua no existe experiencia de aplicación de estas tecnologías de remoción de arsénico. En la investigación realizada se construyó un filtro KANCHAN y un SONO filter, la selección de estas tecnologías se basó en su uso domiciliario, sencillez y bajo costo en construcción y operación, uso de materiales comunes y por el éxito obtenido en las áreas rurales de otros países con problemas de contaminación de arsénico en fuentes de agua para consumo humano. El diseño y configuración de los filtros estuvo determinada por los materiales que están disponibles localmente y que pueden ser encontrados en cualquier parte del país, respetando el principio físico y químico de cada tecnología. Otros criterios considerados para el diseño fue la tasa de filtración, valor límite permisible de arsénico, turbiedad y hierro total que cumplieran con las normas de calidad del agua potable, (Normas CAPRE, 1993).

La evaluación de los filtros se realizó en el CIEMA - UNI con agua proveniente del pozo público del cual se abastece la comunidad de Linda Vista, perteneciente al municipio de Santa Rosa del Peñón, el agua de este pozo presentó una concentración de arsénico total de 73 µg/l. El agua del pozo se recolectaba semanalmente en volumen suficiente a la demandada por los filtros durante la filtración semanal, para ser sometida al proceso de remoción empleando la tecnología KANCHAN y SONO filter y determinar la eficiencia de remoción de arsénico total.

1.1. Justificación.

El arsénico es un carcinógeno para el ser humano. La exposición crónica a niveles altos de arsénico se han vinculado a cánceres en la piel, riñón, pulmón y vejiga, así como otros efectos adversos a nivel neurológicos y cardiovasculares.

En Nicaragua a nivel nacional, el 5.7% de los puntos de abastecimiento de agua sean estos pozos excavados equipados con bomba de mecate (PEM), pozo perforado equipado con bomba de mecate (PPM) y mini acueductos por bombeo eléctrico (MABE), tienen valores de arsénico total en el agua por encima del valor máximo admisible de 10 µg/L (PIDMA – UNI, 2002). Si la prevalencia nacional de los puntos de abastecimiento de agua que son

contaminados naturalmente por arsénico es de 5.7% y existen alrededor de 4,886 sistemas de agua rurales registrados en Nicaragua, (Valle, 2003), se puede estimar que 278 sistemas de agua administrados por los comité de agua potable y saneamiento (CAPS) están contaminados. La mayoría de estos sistemas abastecen pequeñas comunidades rurales dispersas o semi-concentradas en cabeceras municipales y pequeños poblados. Tomando un promedio conservador de 200 personas por sistemas de agua, se puede estimar que aproximadamente 55,600 personas están ingiriendo agua contaminada con arsénico, (UNICEF, 2003).

Por tanto, se evidencia que en el sector rural se requieran de tecnologías, a nivel familiar, para eliminar el arsénico del agua. Algunos investigadores han venido desarrollado algunas tecnologías para ser usadas a nivel de hogar en el sector rural y son menos costosas, prácticas y eficientes para la remoción de arsénico en aguas de consumo humano.

Se decidió realizar la presente investigación sobre la eficiencia de remoción de arsénico utilizando las tecnologías KANCHAN y SONO filter, las cuales se han implementado con éxitos en Nepal y Bangladesh. Los grandes beneficios esperados con estos sistemas de tratamiento de remoción de arsénico a nivel familiar son la de proporcionar tecnologías a bajo costo y de fácil operación, que se puedan construir con materiales locales, y aseguren agua de buena calidad para el consumo humano, reduciendo de esta manera los riesgo en la salud (envenenamiento) por ingesta de consumo de agua con arsénico, por otra parte no utilizan reactivos químicos y se pueden implementar en otras comunidades que tengan problemas de arsénico en el agua de consumo.

1.2. Hipótesis.

“Los sistemas de Filtro de Arsénico KANCHAN y SONO filter remueven de forma eficiente la concentración de arsénico en el rango de 60 $\mu\text{g/L}$ - 80 $\mu\text{g/L}$, logrando alcanzar el valor máximo de concentración de arsénico permitido por las normas aceptadas a nivel nacional”.

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo General.

Evaluar la eficiencia de remoción de arsénico total utilizando las tecnologías de los filtros KANCHAN y SONO filter con agua de pozo con rango de concentraciones de arsénico total que oscila entre 60 $\mu\text{g/L}$ - 80 $\mu\text{g/L}$, ubicado en la comunidad de Linda Vista del municipio de Santa Rosa del Peñón, durante el periodo comprendido de octubre 2008 a enero 2009.

1.3.2. Objetivos Específicos.

Diseñar y construir el filtro KANCHAN y SONO filter con base al diseño original y utilizando materiales locales.

Calcular la eficiencia de remoción de arsénico de los filtros KANCHAN y SONO filter, considerando como variables concentración en el agua de arsénico, hierro, fosfatos; pH, potencial redox, turbiedad y temperatura antes y después del proceso de filtrado.

Determinar la tasa de filtración de agua tratada de cada uno de los filtros evaluados que satisfaga los requerimientos de uso diario para cocinar y preparar alimentos.

Determinar si la calidad del agua después del proceso de filtrado con los filtros KANCHAN y SONO cumple con las normas CAPRE de calidad de agua para uso potable.

Determinar el costo directo en córdobas de cada uno de los filtros de arenas.

II. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.

2.1. Arsénico en el agua.

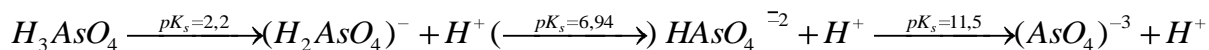
El Arsénico es un elemento que se encuentra en el cuarto periodo de la tabla periódica, tiene un número atómico de 33, 74.92 de masa atómica, y cinco electrones en su órbita exterior (Shashank Pandey *et al*, 2004) Rara vez se encuentra libre en el ambiente natural, su principal vía de dispersión en el ambiente es el agua.(Esparza *et al*, 1998) El Arsénico está presente en forma natural en rocas sedimentarias y rocas volcánicas y en aguas geotermales, con mayor frecuencia como sulfuro de arsénico y arsenopirita, los que se encuentran como impurezas en los depósitos mineros, o como arsenato y arsenito en las aguas superficiales y subterráneas (<http://www.ingenieroambiental.com.ar>, Junio 2008).

En el agua la combinación con el oxígeno le permite formar el arsénico inorgánico pentavalente (As^{+5}) y el arsénico inorgánico trivalente (As^{+3}). En medios alcalinos con alta concentración de oxígeno se encuentra el As^{+5} (arsenato) y en medios ácidos con poca concentración de oxígeno como As^{+3} (arsenito). Por lo que se deduce que el arsenato es encontrado frecuentemente en agua superficiales, en condiciones aeróbicas, mientras que el arsenito ocurre con más frecuencia en aguas subterráneas o de pozo, en condiciones anaeróbicas (<http://www.ingenieroambiental.com.ar>, Junio 2008).

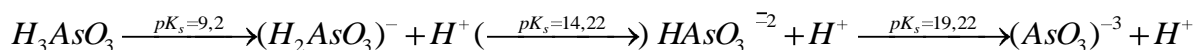
Las especies hidrolizadas de arsénico con valencia 3 son el ácido arsenioso (H_3AsO_3) y las sales de ácido ortoarsenioso (arsenito diácido H_2AsO_3^- , arsenito monoácido HAsO_3^{-2} y arsenito AsO_3^{-3}) y con valencia 5 son el ácido ortoarsénico (H_3AsO_4) y las sales de ácido ortoarseniato (arseniato diácido H_2AsO_4^- , arseniato monoácido HAsO_4^{-2} y arseniato AsO_4^{-3}) (Carbonell A.A. *et al*, 1995). Las condiciones que favorecen la oxidación química y biológica inducen el cambio a especies pentavalentes y aquellas que favorecen la reducción cambiarán el equilibrio al estado trivalente (Esparza *et al*, 1998).

La eficiencia de los procesos de tratamiento del arsénico, depende del grado de disociación del arsénico. La capacidad de ionización del Arsénico (V) le permite combinarse fácilmente con otros compuestos, lo cual hace que su remoción por diversos métodos sea más eficiente

en comparación con la del Arsénico (III) (<http://www.ingenieroambiental.com.ar>, Junio 2008) Los arsenatos tienen mayor capacidad de ionización debido a la presencia del doble enlace, la molécula que al perder el ion hidrógeno por la disociación, queda con carga negativa, formando varios aniones según las ecuaciones, (Esparza *et al*, 1998)



En aguas con altos niveles de oxígeno, el As⁺⁵ como H₃AsO₄ es estable, existiendo las especies en un rango de pH de entre 2 a 13, la distribución de estas se muestra en la tabla 1. Como resultado de la disociación del ácido arsenioso característico en aguas subterráneas con pH mayor de 7, se presentan las siguientes formas, (Esparza *et al* 1998)



En condiciones anóxicas, aún a pH mayor que 7 el arsénico es estable en especies dominantes no iónicas (Esparza *et al*, 1998).

Lo anterior determina que los arsenatos y arsenitos se disocian a un pH muy diferente. En un rango de pH entre 6,5 y 8,5 característico del agua natural, las formas predominantes de arsenato son las especies H₃AsO₄, (H₂AsO₄)⁻ y las formas predominantes de arsenitos es la especie H₃AsO₃ (Esparza *et al*, 1998).

Tabla 1. Estabilidad y predominio de las especies de arsénico variando los rangos de pH en el medio acuático.

pH	0-9	10-12	13	14
As ⁺³	H ₃ AsO ₃	H ₂ AsO ₃ ⁻	HAsO ₃ ⁻²	AsO ₃ ⁻³
pH	0-2	3-6	7-11	12-14
As ⁺⁵	H ₃ AsO ₄	H ₂ AsO ₄ ⁻	HAsO ₄ ⁻²	AsO ₄ ⁻³

Fuente: (Esparza *et al*, 1998)

2.1.1. Especiación del arsénico.

El potencial redox (Eh) y el pH son los parámetros más importantes que controlan la especiación del arsénico, o sea su estado de oxidación. Bajo condiciones oxidantes, las especiaciones pentavalentes Arsénico (V) son estables con un pH creciente: H_2AsO_4^- es dominante cuando el pH es menos de 6.9 aproximadamente. Con un pH superior a 6.9, HAsO_4^{2-} predomina, ver tabla 1. En condiciones reductantes, el Arsénico (V) es reducido en Arsénico (III) y las especiaciones trivalentes Arsénico (III) predominan (Esparza *et al*, 1998).

En contraste, el Arsénico (V) depende del pH. El Arsénico (III) es encontrado virtualmente independiente del pH en ausencia de aniones adsorbentes (Smedley P.L. *et al*, 2002). Más a menudo el Arsénico (III) es encontrado en condiciones de reducción en el agua subterránea, mientras lo contrario ocurre con Arsénico (V) que es encontrado en condiciones oxidantes del agua subterránea, (Vu y colaboradores, 2002).

Las concentraciones de Arsénico (III) y Arsénico (V) varían ampliamente dependiendo de las condiciones reducción-oxidación presentes en el medioambiente geológico (Jain and Ali, 2000).

2.1.2. Distribución del arsénico.

La distribución en el agua de los estados de oxidación del arsénico en función del pH y del Eh a una temperatura de 25° C y bajo una presión de 1 atmósfera es presentada en la figura 1.

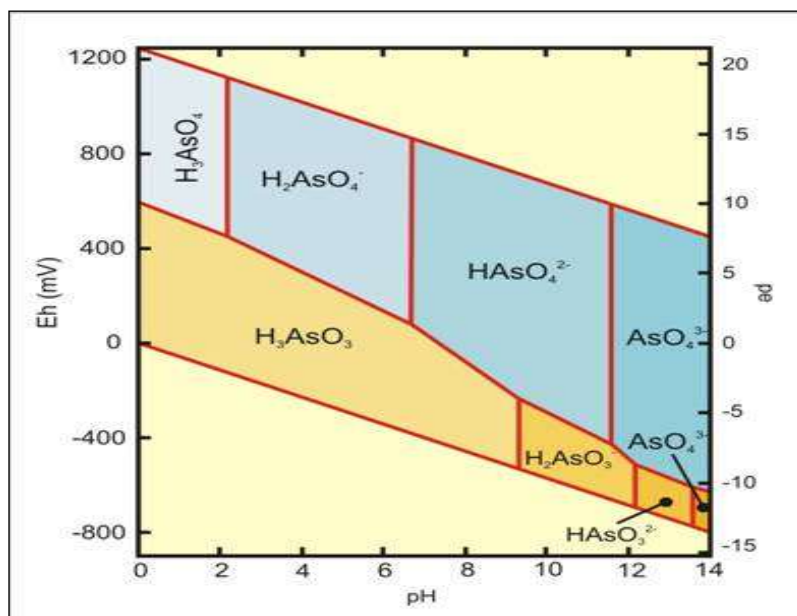


Figura 1. Distribución en el agua de las especies de arsénico en función de pH-Eh. (Lillo Javier, 2005).

El diagrama pH vs. Eh es una herramienta clave para entender la movilidad del arsénico en el agua subterránea y marcar guías para su eficiente tratamiento, (Simeonova y colaboradores, 2006).

A diferencia de otras trazas de metales tóxicos cuya solubilidad tiende a bajar cuando el pH incrementa, más oxianiones, incluyendo el As^{+5} , tienden a convertirse en más soluble cuando el pH incrementa, ver figura 2, diagrama de pH para arsénico (V). Cuantos más otros metales se convierten en insoluble con pH neutro, el Arsénico es soluble cada vez que está cerca del pH neutro en concentraciones relativamente altas. Esta es la razón porque el agua subterránea es contaminada fácilmente con arsénico y otros oxianiones.

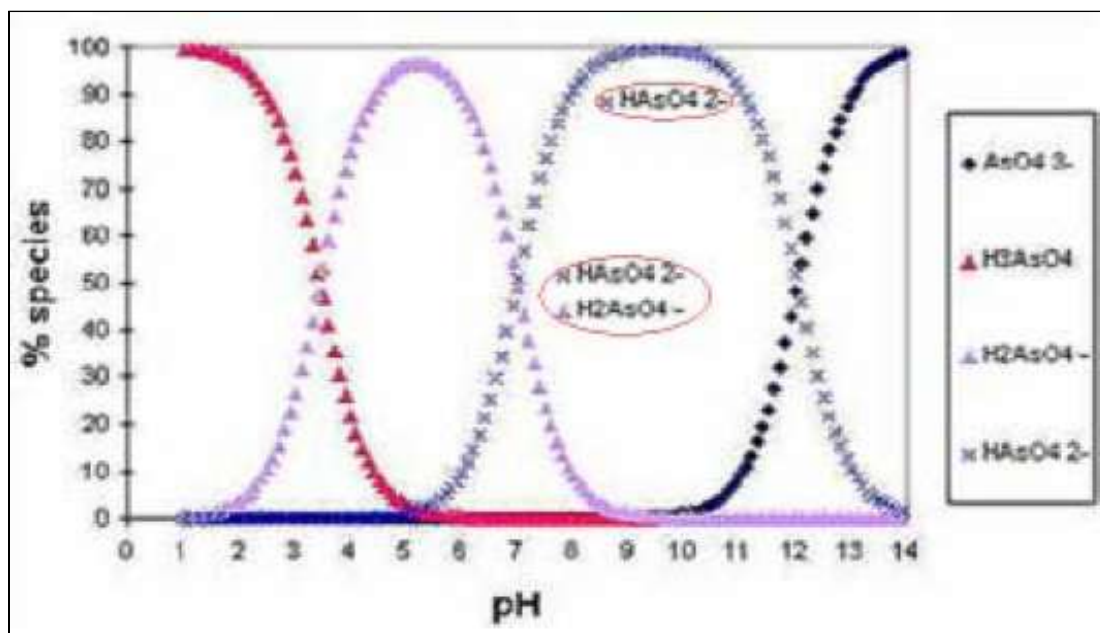


Figura 2. Diagrama de pH para arsénico (V). (Tomado de Vu *et al*, 2003).

2.2. Toxicidad del arsénico.

El arsénico es uno de los tóxicos más viejos conocidos por la humanidad. Tiene seis características específicas, según Azcui y Nriagu, (1994):

1. Es un tóxico violento en la ingestión aguda.
2. Es sumamente tóxico a la exposición a largo plazo en concentraciones muy bajas.
3. No es visible en el agua y comida.
4. No tiene gusto.
5. No tiene olor.

La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, estructura química y solubilidad en el medio biológico. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: Arsina > As⁺³ inorgánico > As⁺³ orgánico > As⁺⁵ inorgánico > As⁺⁵ orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental, (Esparza *et al*, 1998).

Las principales rutas de exposición de las personas al arsénico son la ingesta e inhalación, que es acumulable en el organismo por exposición crónica y a ciertas concentraciones. La

toxicidad del arsénico aumenta considerablemente con su estado de oxidación de Arsénico (V) a Arsénico (III). El As^{3+} es alrededor de 60 veces más tóxico que el estado oxidado As^{5+} y los componentes inorgánicos son alrededor de 100 veces más tóxicos que los componentes orgánicos del arsénico, (Jain and Ali, 2000).

El periodo de latencia de las lesiones cutáneas provocadas por el arsénico (es decir, el tiempo transcurrido desde la primera exposición hasta la manifestación de la enfermedad), en particular de las queratosis, es por regla general de unos 10 años. El periodo de latencia de los cánceres de la piel e internos es de más de 20 años a partir del momento de la exposición. La población que ha estado expuesta a la ingesta por largo tiempo a aguas subterráneas contaminadas con arsénico indican que una de cada 10 personas que toman agua con 500 $\mu\text{g/L}$ de arsénico, pueden acabar muriendo de cáncer causado por el arsénico, en particular de cáncer de pulmón, vejiga y piel, (OMS, 2002).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norte América, USEPA, clasifica al arsénico como carcinógeno en el grupo A, debido a que existe evidencia suficiente de carcinogenicidad tanto en animales como en poblaciones humanas. La exposición a 0,05 mg/L puede causar 31,33 casos de cáncer de la piel por cada 1.000 habitantes y ha considerado bajar el límite máximo de aceptación de 0,050 mg/L , al de 0,010 - 0,020 mg/L . La Agencia Internacional para la investigación (IAR por sus siglas en inglés) sobre el cáncer, lo ha clasificado en el grupo I, porque tienen pruebas suficientes de la carcinogenicidad para seres humanos. La eliminación natural del organismo humano es por vía urinaria, heces, sudor y epitelio de la piel (descamación).

El valor guía de la OMS vigente, respecto de la presencia de arsénico en el agua de bebida es de (0,01 mg/L). Este valor límite es provisional, porque hay incertidumbres no resueltas científicamente (OMS, 2006). Si se obtuviera de estudios epidemiológicos rigurosos mayor información sobre los efectos sanitarios en niños, observados en diferentes condiciones, se aportaría una contribución al desarrollo ulterior de los valores Guías. Se desconocen todavía el mecanismo de la carcinogenicidad y la respuesta a niveles bajos de ingesta. Además, se señalan diferencias considerables entre los efectos según los países y regiones,

diferencias cuyas razones todavía no se entienden lo suficiente. La susceptibilidad de cada uno a la intoxicación por arsénico, también difiere considerablemente, según la edad, el estado nutricional, las condiciones sociales y otros factores insuficientemente conocidos.

En los últimos años se advierte una tendencia general en países industrializados a reducir los límites máximos permitidos de arsénico en agua de bebida, debido al riesgo carcinogénico del mismo para el ser humano en piel y algunos órganos internos (pulmón, hígado, riñón y vejiga).

Tabla 2. Límites y valores guías de arsénico para Agua de Bebida según distintos organismos.

Valores Internacionales OMS (Organización Mundial de la Salud)	Valor Guía Provisional 10 µg/ l
USEPA (Agencia de Protección Ambiental de U. S.)	Nivel Máximo de Contaminación (MCL) 50 µg/L
CEE (Comunidad Económica Europea)	Concentración Máxima Admisible (MAC) 50 µg/l
Valores Nacionales y Provinciales CAA (Código Alimentario Argentino)	Concentración Máxima 50 µg/ l

En el año de 1993, el Consejo de Ministros de Salud Pública de Centroamérica asignó al comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE) la Coordinación del Sector de Agua Potable y Saneamiento de los países del área, el cual elaboró las normas técnicas para Centroamérica de la calidad del agua potable, mismas que han sido revisadas y aceptadas por el Ministerio de Salud de nuestro país, y en la cual se estable un valor máximo admisible de arsénico en el agua de consumo humano de 10 µg/l, (Normas CAPRE, 1993).

2.3. Proceso de tratamiento de arsénico.

Los procesos químicos y fisicoquímicos en la remoción de arsénico se pueden resumir como:

Oxidación/ Reducción: Estas reacciones no remueven el arsénico de la solución, pero usualmente son utilizadas para optimizar otros procesos, especialmente para oxidar el arsenito (As^{+3}) a arseniato (As^{+5}). La reacción puede ser muy lenta si tiene que darse a partir del oxígeno presente en el aire. Para acelerar la oxidación química es aconsejable usar cloro, dióxido de cloro, permanganato de potasio u ozono, (Torres *et al*, 2006).

Precipitación: El arsénico disuelto en el agua es transformado a sólido mineral de baja solubilidad y formar sólidos con otros compuestos cuando se adiciona un coagulante. Este fenómeno es conocido con el nombre de co-precipitación. Los sólidos formados, llamados flóculos, pueden quedar suspendidos y requieren la remoción, a través de los procesos de separación sólido/líquido, típicamente la coagulación y la filtración, (Torres *et al*, 2006).

Adsorción e intercambio iónico: Varios materiales sólidos, incluidos flóculos de hidróxido de hierro y aluminio, tienen una fuerte afinidad para adsorber el arsénico. El arsénico es fuertemente atraído por las superficies de adsorción de estos sólidos y es eliminado de la solución. El intercambio iónico involucra el desplazamiento reversible de un ión adsorbido dentro de una superficie sólida por un ión disuelto, (Torres *et al*, 2006).

Separación sólido/líquido: La precipitación, co-precipitación, adsorción e intercambio iónico transfieren el contaminante desde la fase disuelta a la fase sólida. En algunos casos el sólido es grande y fijo (ej. resinas de intercambio iónico), y la separación sólido-líquido no es requerida. Si los sólidos son formados *in situ*, a través de la precipitación o coagulación, tienen que ser separados del agua. La forma más efectiva de hacerlo es mediante una filtración, (Torres *et al*, 2006).

Exclusión física: Algunas membranas sintéticas son permeables a ciertos compuestos disueltos, pero excluyen otros. Estas membranas pueden actuar como filtro molecular para remover el arsénico disuelto, juntamente con otros compuestos particulados disueltos, (Torres *et al*, 2006).

2.4. Técnica de remoción de Arsénico

Actualmente existen alrededor de 14 técnicas para remover el arsénico del agua. Las tecnologías para la remoción de arsénico (KANCHAN y SONO filter), objeto de evaluación en el presente estudio, se ubican en la técnica de remoción por adsorción del arsénico a base de hierro, (Torres *et al*, 2006).

2.5. Remoción de arsénico a base de hierro.

Los sistemas basados en hierro para tratar el agua contaminada con arsénico son simples y de bajo costo, (Mahin et al., 2008). Cuando la concentración natural de Fe no es suficiente para alcanzar el nivel necesario para la remoción de arsénico, este puede ser adicionado, (EPA, 1997).

Debido a la dificultad de remover As^{+3} , por coagulación, se requiere de su oxidación a As^{+5} . Durante la remoción del arsénico son importantes los procesos de oxidación de las formas de As^{+3} a As^{+5} y de su adsorción por el hidróxido férrico amorfo, formado durante la coagulación, (Hering, y col., 1996).

La oxidación del As^{+3} a As^{+5} se produce según las siguientes reacciones:



El arsénico se adsorbe mejor a los hidróxidos de hierro que otros oxidantes como el caso de los de aluminio (alúmina). El hidróxido férrico asegura la completa oxidación del Arsénico (III) a Arsénico (V) y es responsable de la adsorción del Arsénico (V). La oxidación previa del hierro Fe^{+2} a Fe^{+3} conduce a la formación de hidróxidos que remueven el arsénico soluble por reacciones de adsorción y co-precipitación. La cantidad de Fe removido se traduce como la dosis de coagulante. Con Fe^{+2} sin oxidar no se produce la remoción de Arsénico, (Esparza *et al*, 1998).

Superponiendo el diagrama pH-Eh de las especies de hierro con la del arsénico se puede obtener la zona de afinidad del Arsénico (V) con las sales de hierro. La figura 3 muestra la

zona de remoción efectiva de arsénico en función de las condiciones del potencial de oxidación- reducción, pH-Eh. En esta zona, el anión de arsénico queda adsorbido sobre los hidróxidos de hierro. En la figura 4 se observa además el arsénico adsorbido que se puede liberar en el agua subterránea que presente poder de reducción, (Petkova *et al*, 1997).

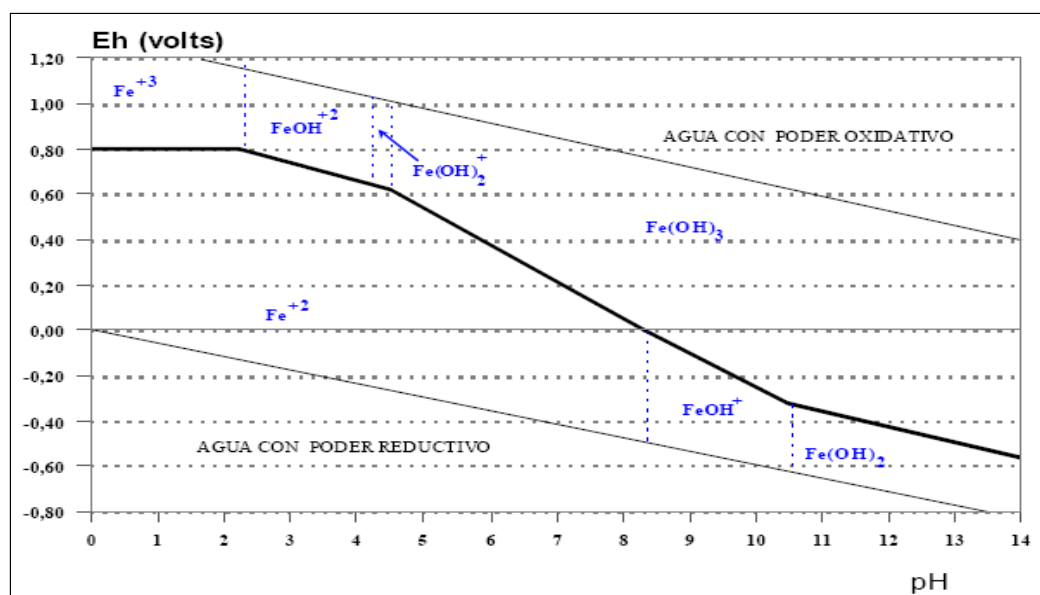


Figura 3. Distribución de las especies de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Petkova *et al*, 1997).

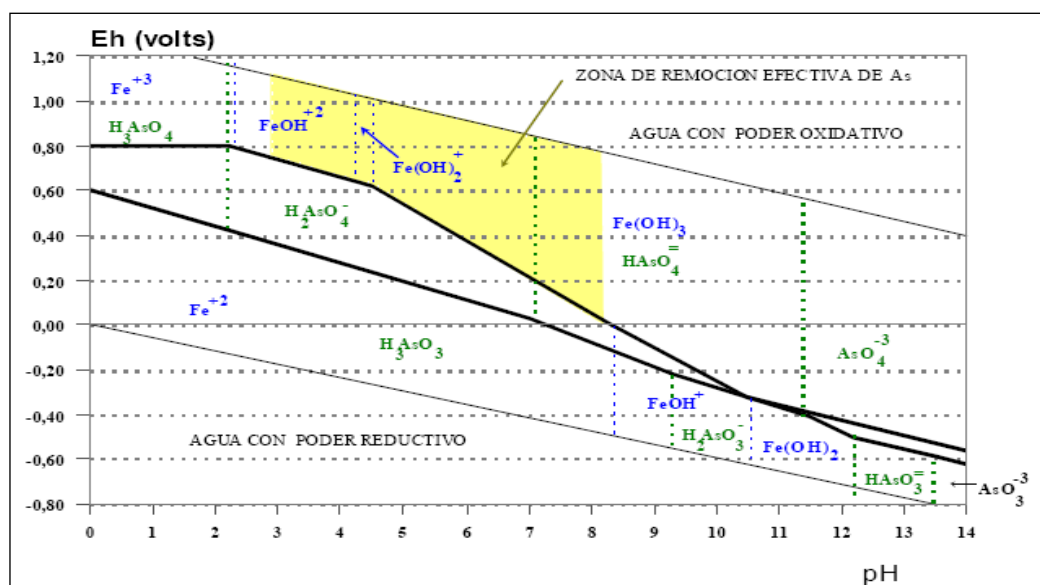


Figura 4. Movilidad de arsénico en presencia de hierro en función de pH-Eh. (Tomado de Petkova *et al*, 1997).

Los posibles mecanismos de remoción del arsénico son la interacción molecular del sistema arsénico/agua/hidróxido de hierro/arena, la Interacciones eléctricas en la superficie y la Interacciones del arsénico con el agua, (Esparza *et al*, 1998).

2.5.1. Influencia del hierro natural.

Normalmente de forma natural en el agua subterránea los niveles de hierro presentan concentración insuficiente o no se encuentran en el estado de valencia adecuado para remover el arsénico, (Mahin *et al*, 2008).

El hierro en el agua subterránea se encuentra en el estado Fe^{+2} y el arsénico en estado As^{+3} , para que se produzca las reacciones químicas es necesario que el hierro se oxide de Fe^{+2} pase a Fe^{+3} , permitiendo que el arsénico se oxide de As^{+3} a As^{+5} que es más fácil remover que el anterior, (Mahin y colaboradores, 2008).

El mecanismo de reacción entre el arsénico y el hierro es un proceso catódico, o sea, de reducción del arsénico que ocurre, gracias a los electrones que surgen de la reacción anódica del hierro, (Campos, 2003).

2.5.2. Influencia de los fosfatos.

Niveles significativos de fosfatos son encontrados de forma natural en el agua subterránea en algunas regiones contaminadas con arsénico, el que puede potencialmente reducir la eficiencia de ciertos tratamientos basados con el hierro. Iguales condiciones que favorecen la desorción del arsénico de la oxidación de metal asociados con sedimentos a menudo favorecen los altos niveles de fosfatos, (Mahin *et al.*, 2008).

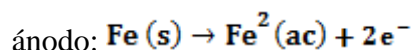
Los resultados del análisis de la proporción de hierro y fosfato en el agua subterránea puede ser un buen indicador de la eficacia del sistema de remoción de arsénico basado en hierro en zonas con alto nivel de arsénico, (Mahin *et al.*, 2008). Bajo ciertas condiciones (alto pH y/o bajo Fe), el fosfato puede interferir con la remoción de arsénico del agua para consumo humano en sistema de remoción a base de hierro, (Meng *et al.*, 2002; Tyrovola *et al.*, 2006; Roberts *et al.*, 2004; Su and Puls, 2001).

Generalmente los tres parámetros más importantes para analizar el contenido de arsénico en pozos son (1) hierro total, (2) fosfatos y (3) pH. En el caso del fosfato los análisis de laboratorio debe reportar resultados de fosfato (PO_4), fosfato como P ($\text{PO}_4\text{-P}$) o fósforo (P), (Mahin *et al.*, 2008).

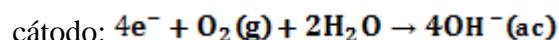
Pruebas de campo en Bangladesh de 5 tecnologías para remover arsénico revelaron que todas presentaron pobre desempeño en área con elevado pH (7.5-8) y niveles de fosfato PO_4 alrededor de 10 mg/L, el cual es equivalente a aproximadamente a 3 mg/L de $\text{PO}_4\text{-P}$, (BCSIR, 2003).

2.5.3. La corrosión del hierro.

El proceso mismo es de naturaleza electroquímica. La corrosión del hierro ocurre sólo en presencia de oxígeno y agua. Sobre una parte de la superficie del objeto de hierro tiene lugar la oxidación., (Mortimer Ch. E., 1990).



En otro sitio de la superficie tiene lugar la reducción, involucrando $\text{O}_2(\text{g})$ y H_2O .



Por lo tanto, en efecto se establece una pila voltaica en miniatura. Los electrones producidos en la región anódica se mueven a través del hierro hacia la región catódica.

Los cationes, iones de Fe^{2+} , producidos en el ánodo, se mueven a través del agua sobre la superficie del objeto hacia el cátodo. Los aniones, iones de OH^{-} , producidos en el cátodo, se mueven hacia el ánodo. En alguna parte entre estas dos regiones, se encuentran los iones y forman $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Sin embargo, el hidróxido de hierro (II) no es estable en presencia de humedad y oxígeno. El hidróxido se oxida a hidróxido de hierro (III), el que en realidad es un hidrato de óxido de hierro (III), $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ o hierro corroído, herrumbroso, (Mortimer Ch. E., 1990).

Los sitios donde un objeto corroído de hierro adquiere picaduras, son las regiones: anódicas donde el hierro se disuelve como iones de Fe^{+2} . Las regiones catódicas son aquellas que están más expuestas a la humedad y al aire, puesto que el $\text{O}_2(\text{g})$ y el agua están

involucrados en la reacción catódica. La herrumbre siempre se forma en los puntos algo distanciados de aquellos donde ocurre la excoiación (entre las regiones anódicas y catódicas). La corrosión misma se forma en sitios entre estas dos regiones, generalmente, más cerca de la región catódica que de la anódica- la transformación del $\text{Fe}(\text{OH})_2$ en herrumbre requiere $\text{O}_2(\text{g})$ y H_2O , (Mortimer Ch. E., 1990).

2.6. Filtración lenta de arena.

Es un proceso natural que se desarrolla en forma natural, sin la aplicación de sustancias químicas, pero requiriendo de un buen diseño así como de una apropiada operación y cuidadoso mantenimiento para no reducir la eficiencia del filtro lento, (Van y colaboradores, 1978).

La filtración lenta (o filtración biológica) se consigue al hacer circular el agua cruda a través de un manto poroso, usualmente arena. Durante el proceso, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente proceso de degradación química y biológica que reducen a la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta su subsecuente retiro o limpieza. (Orozco *et al.*, 1992).

En los poros o espacios vacíos del medio filtrante (los cuales constituyen aproximadamente el 40% del volumen), se desarrolla un activo proceso de sedimentación, fenómeno que se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas, (Orozco *et al.*, 1992).

Etapas de remoción del proceso de filtración: transporte y adherencia. Una vez que la partícula se ha adherido a la superficie del grano de arena, la película biológica que envuelve a estos puede metabolizar los contaminantes orgánicos, produciendo una remoción permanente a través del mecanismo biológico, (Orozco *et al.*, 1992).

2.6.1. Mecanismo de transporte.

En esta etapa de remoción básicamente hidráulica, ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre una colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos mecanismos son: intercepción, sedimentación y difusión. Para comprender estos mecanismos, hay que considerar primero la forma en que el fluido se comporta alrededor de un grano de arena considerado como una obstrucción., (Orozco *et al.*, 1992).

Si una partícula es llevada por las líneas de flujo, puede colisionar con un grano de arena, adherirse a él y de este modo ser removida.

Cernido: El mecanismo de cernido actúa exclusivamente en la superficie de la arena y solo aquellas partículas de tamaño mayor que los intersticios de la arena. Su eficiencia es negativa para el proceso porque colmata rápidamente la capa superficial, acortando las carreras de filtración, (Orozco *et al.*, 1992).

Los sólidos grandes, especialmente material filamentoso como las algas clodoferas, forman una capa esponjosa sobre el lecho que mejora la eficiencia del cernido, actuando como un pre filtro sobre el lecho de arena, protegiéndolo de una rápida colmatación y permitiéndole cumplir con su función de filtración a profundidad.

Intercepción: Es una de las formas en que las partículas pueden colisionar con los granos de arena. La intercepción solamente puede ocurrir si una partícula es conducida mediante una línea de flujo muy cerca del grano de arena, de modo que roce la superficie de este. Cuanto más grande es la partícula, será más factible que ocurra la intercepción, (Orozco *et al.*, 1992).

Sedimentación: La fuerza de gravedad actúa sobre todas las partículas, produciendo la componente vertical de la resultante de la velocidad de conducción, la cual puede causar la colisión de la partícula con el grano de arena. Su influencia es perceptible solamente con partículas mayores de 10 μ m (Yao, 1971).

Difusión: Es el tercer mecanismo de transporte representativo en la filtración lenta. La energía térmica de los gases y líquidos se pone de manifiesto en un movimiento desordenado de sus moléculas. Cuando esas moléculas colisionan con una pequeña

partícula, esta también empieza a moverse en forma descontrolada, en una serie de pasos cortos, a menudos denominados de “andar desordenado”, (Orozco *et al.*, 1992).

Si la partícula es conducida por las líneas de flujo, la difusión puede cambiar su trayectoria, moviéndose de una línea de flujo a otra, pudiendo eventualmente colisionar con un grano de arena. Como se puede inferir, cuanto más baja es la velocidad del flujo, mas pasos podrá dar la partícula por una unidad de tiempo. Por lo tanto, la velocidad intersticial decrece. Así mismo, a medida que la temperatura se incrementa, aumenta también la energía térmica y, por consiguiente, el número de pasos por unidad de tiempo y la probabilidad de colisión. La difusión es un mecanismo muy importante con partículas de tamaño menor a $1\mu\text{m}$ (Yao, 1971).

Flujo intersticial: En una porción de lecho filtrante con muchos granos de arena, las líneas de flujo tienen una configuración tortuosa. Por definición, el flujo entre dos líneas cualesquiera de corriente es similar y el espacio dentro del cual discurren se denomina conducto cilíndrico. La configuración de estos conductos cilíndricos es tortuosa: se bifurcan, se unen y se vuelven a bifurcar en diferentes puntos. Este continuo cambio de dirección del flujo crea mayor oportunidad de colisión, al cruzarse constantemente las partículas y los granos de arena, (Orozco *et al.*, 1992).

Si una partícula es conducida por las líneas de flujo intersticial, será más probable que en cualquier punto, durante su paso entre los granos de arena, choque contra uno de ellos. La posibilidad de chocar dentro de un tramo dado de su trayectoria depende de la dimensión de los granos de arena, de la velocidad intersticial y de la temperatura. Cuanto más pequeño los granos de arena, mayor probabilidad de colisión. La porosidad del medio es mayor y por lo tanto, hay mayor cantidad de conductos, produciéndose mayor número de bifurcaciones. Así mismo, cuanto más baja la velocidad intersticial, mayor posibilidad de colisionar. Las velocidades más bajas permiten mayor oportunidad de colisión por unidad de distancia con el mecanismo de difusión. Sin embargo, a medida que la velocidad intersticial se incrementa, hay un punto por encima del cual la velocidad ya no influye aunque siga aumentando. Finalmente las temperaturas altas intensifican el mecanismo de difusión, produciéndose una mayor probabilidad de colisión, (Orozco *et al.*, 1992).

Probabilidad de colisión: Todo el análisis efectuado hasta ahora está estrechamente relacionado con la oportunidad de colisión entre una partícula y un grano de arena, expresado mediante el coeficiente (η). El número de colisiones por unidad de desplazamiento determina el potencial de remoción mediante la filtración. La remoción final dependerá de que se produzca la adherencia, (Orozco *et al.*, 1992).

2.6.2. Mecanismo de adherencia.

Mientras no se produce la adherencia, no hay remoción. La fracción de partículas que se adhieren en relación con el número de colisiones, por definición es el coeficiente α . Investigaciones al respecto sugieren que el desarrollo de la película biológica proporciona a los granos de arena una superficie absorbente que favorece la adherencia. Otra suposición, es que las enzimas extracelulares coagulan las partículas, permitiendo así la adherencia. Se desconoce en qué situaciones aumenta o disminuye el valor de α , (Orozco *et al.*, 1992).

Cuando el filtro comienza a funcionar, antes de que se desarrolle la película biológica, la remoción de coliformes es cercana a cero y, por lo tanto, $\alpha=0$ (Bryck y colaboradores, 1987). Después de que la película biológica se ha desarrollado, la tasa de remoción es del orden de 2 a 4 logaritmos, encontrándose el coeficiente α cercano a 1. Esto indica la importancia de la película biológica en la eficiencia del filtro lento. Los microorganismos pueden morir o ser ingeridos por los depredadores, antes de que logren alcanzar una superficie absorbente. Por lo tanto, la remoción indicada puede deberse a muerte o predación adicional a la adherencia. Sin embargo, luego de producida la adherencia, ocurrirá inevitablemente la predación y la muerte, (Orozco *et al.*, 1992).

El filtro se considera maduro cuando la película biológica ha llegado a su máximo desarrollo para las condiciones existentes. El límite máximo de desarrollo de la película biológica no está aun definido, necesitándose mayor investigación al respecto para obtener esta importante información, (Orozco *et al.*, 1992).

No obstante, investigaciones realizadas por Bellamy y colaboradores (1985), Bryck (1987) y Barret (1989), han demostrado que el límite máximo de desarrollo de la capa biológica, se relaciona con el contenido de nutrientes en el agua.

Puede esperarse que los filtros lentos que tratan aguas con bajo contenido de nutrientes, presenten una remoción de coliformes fecales de 2 log, después de producirse la maduración de la película biológica (Bellamy y colaboradores, 1985). En cambio, con aguas ricas en nutrientes, es de esperar que se obtenga remociones del orden de 3 log (Bellamy, 1985), evidenciándose en otros casos eficiencias de remoción de hasta 4 log (Barret, 1989).

2.6.3. Mecanismo biológico.

La remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto tanto del mecanismo de adherencia como del mecanismo biológico.

Al iniciarse el proceso, las bacterias transportadas por el agua pueden multiplicarse en forma selectiva, contribuyendo a la formación de la película biológica del filtro y utilizando como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica.

Las bacterias oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de esta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta son convertidas en materia viva. Los productos de desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores para ser utilizados por otros organismos, (Orozco *et al.*, 1992).

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y es acompañado de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así sucesivamente. De este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua cruda, es gradualmente descompuesta en agua, bióxido de carbono y sales relativamente inocuas, tales como sulfatos, nitratos, y fosfatos (proceso de mineralización), los cuales son descargados en el efluente de los filtros, (Orozco *et al.*, 1992).

La actividad bacteriológica descrita es más pronunciada en la parte superior de lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de alimento. Cuando se limpian las capas superiores del filtro, se remueven las bacterias, siendo necesario un nuevo periodo de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la

actividad bacteriológica necesaria. A partir de los 0.30m a 0.50m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración); en cambio, se realizan reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica (tales como aminoácidos) en amonio, y a los nitritos en nitratos (nitrificación), (Orozco *et al.*, 1992).

2.6.4. Pérdida de carga.

La pérdida de carga en el filtro lento de arena se produce al atravesar el caudal de operación, la película biológica y el lecho de arena en toda su profundidad. A medida que progresa la carrera del filtro, se desarrolla el schmutzdecke y se incrementa la resistencia hidráulica causante de la mayor parte de la pérdida de carga., (Orozco *et al.*, 1992).

La remoción del schmutzdecke, usualmente mediante alguna forma de raspado en los filtros pequeños, permite que la pérdida de carga recobre el nivel de lecho filtrante limpio. Generalmente, la pérdida de carga en el lecho limpio es de 10cm aproximadamente, dependiendo este valor de la tasa hidráulica de diseño, de la temperatura y de las características del lecho de arena, (Orozco *et al.*, 1992).

2.7. Tecnologías domiciliar para remover arsénico.

La revisión bibliográfica indica que existen una variedad de dispositivos que han sido comprobado su eficiencia o están siendo desarrollados para remover arsénico a nivel domiciliar a base de hierro, las más conocidas son ALUFLOC, jabones de hierro, virutas de hierro, congelación natural, arenas con óxidos de hierro, 2-Kolshi, 3-Kolshi, SONO filter y filtro KANCHAN, (Torres *et al.*, 2006).

En esta sección se describen las principales características sobre el funcionamiento de los filtros **KANCHAN** y **SONO filter** que son objetos del presente estudio.

2.7.1. Características del filtro KANCHAN.

El filtro de remoción de arsénico KANCHAN™ (KAF por sus siglas en ingles) evolucionó a partir del filtro BIOSAND, que fue desarrollado por el Dr. Manz de la Universidad de Calgary, Canadá. El KAF es un dispositivo de tratamiento de agua que remueve arsénico,

patógenos, hierro, turbiedad, color y algunos otros contaminantes presentes en el agua de consumo humano, sobre la base de la filtración de arena lenta desarrollada en los años de 1820 en Escocia por Robert Thom y en Inglaterra por James Simpson y los principios de adsorción de hidróxido de hierro. Fue desarrollado por investigadores del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en ingles) de EUA, Organización de la Salud Pública y Medioambiente (EMPHO por sus siglas en ingles) de Nepal, y el Programa de Apoyo para el suministro y tratamiento de agua en las comunidades del área rural (RWSSSP por sus siglas en ingles) de Nepal. A nivel mundial ha sido merecedor de los premios MIT IDEAS 2002, Banco Mundial 2003, EPA 2005, Wall Street Journal Technical Innovation Award 2005-Categoría Medioambiente, entre otros, (Ngai and Wallewijk, 2003).

El Filtro de Arsénico KANCHANTM comprende dos unidades de remoción: la unidad de remoción de arsénico y la unidad de remoción de patógenos. La unidad de remoción de arsénico consiste en una pana plástica que sirve de soporte y que contiene clavos de hierro oxidados y trozos de ladrillos, el arsénico se remueve mediante la adsorción en los hidróxidos de hierro, mientras que la unidad de remoción de patógenos lo conforma un filtro lento de arena, el cual esta soportado por capas de arena gruesa y grava. Durante el proceso de purificación del agua cruda, esta se hace pasar a través de un lecho poroso de un medio filtrante de arena, durante este paso la calidad del agua se mejora considerablemente por reducción del número de microorganismos, eliminación de materias en suspensión y de material coloidal, (Ngai and Wallewijk, 2003)

El AKF se construye con materiales sencillos disponibles en los mercados locales. Estos materiales incluyen: container de plástico, tuberías PVC, clavos de hierro, ladrillos, arena y grava. La construcción del filtro se puede llevar a cabo por técnicos localmente entrenados, (Murcott and Ngai, 2005).

Estudios realizados en Nepal presentan que el KAF es un filtro efectivo para la remoción arsénico, hierro, como también patógenos (Shrestha *et al.*, 2003). Basado en un estudio piloto en Nepal (Ngai and Walewijk, 2003) encontraron que el KAF puede ser efectivo

removiendo Arsénico en el (rango = 87% a 96%, media = 93%), Coliforme total (rango = 0% a > 99%, media 59%), E. Coli (Rango = 0% a >99%, media 64%), y hierro (rango = >90% a > 97%, media > 93%) (Ngai and Walewijk, 2003). A los usuarios les gusta por la alta tasa de filtración (rango = 4 a 23 L/hr, media 14 L/hr), simple operación, mantenimiento mínimo, así como por la claridad y buen sabor del agua tratada, (Ngai and Walewijk, 2003).

Las principales características del filtro KANCHAN son los siguientes:

2.7.1.1. Remoción de arsénico.

Para la remoción del arsénico utilizando el KAF, los clavos son oxidados al ser expuestos al aire y la humedad, produciéndose partículas de hidróxido de hierro férrico, quien es un excelente adsorbente del arsénico. En el proceso de adsorción, el arsénico es atraído hacia sitios de adsorción sobre las superficies de materiales sólidos como lo es el hidróxido de hierro. Los clavos de hierro oxidados actúan como medios de comunicación de adsorción. Los clavos complementan los niveles de hierro presentes de manera natural en el agua subterránea. Los altos niveles de hierro en el agua subterránea favorecen su eficiencia de remoción, (Ngai and Murcott, 2005).

Cuando el agua cargada de arsénico entra en contacto con la superficie de los clavos oxidados ocurre una reacción de complejación, donde el arsénico es rápidamente adsorbido por el hidróxido de hierro. Las partículas de hierro cargadas de arsénico que se precipitan son atrapadas en los pequeños espacios entre las partículas de la arena fina a unos pocos centímetros de la superficie, (Ngai and Murcott, 2005).

2.7.1.2. Remoción de Patógenos.

Normalmente las aguas subterráneas contienen bajos niveles de contaminación por patógenos, tomando como indicador la no presencia de E. Coli o bacterias termotolerantes. Ocasionalmente altos niveles de patógenos son el resultado de las malas prácticas de higiene y/o inapropiadas prácticas de extracción del agua de pozo. La remoción de los patógenos en el KAF es similar a un filtro de arena lento, el cuál consta principalmente de

cuatro mecanismos generales: retención física, adsorción, depredación, y extinción físico natural, (Ngai and Murcott, 2005).

La retención física se refiere al atropamiento de partículas físicas que son demasiado grandes y no pueden pasar por los pequeños poros de la arena fina. Este proceso puede remover parásitos, quistes y bacterias más grandes. Algunas bacterias y virus son demasiado pequeños, por lo tanto, son retirados por otros medios, como depredación y adsorción, (Ngai and Murcott, 2005).

La adsorción se refiere al proceso por el que las partículas extrañas son adsorbidas por otras partículas y por el medio filtrante, es decir la arena. Este proceso es afectado por una variedad de interacciones físicas entre células microbianas y el entorno poroso, incluyendo la hidrofobicidad (por ejemplo: la polaridad) y la carga eléctrica superficial, (Ngai and Murcott, 2005).

Debido a la retención física de las partículas extrañas como tierra y sustancias orgánicas que son atrapadas en la superficie de la capa de arena fina, se forman una capa fina. Con el oxígeno disuelto y los nutrientes en el agua de influente, una población biológica (llamada Biofilm) crecerá dentro de la capa fina alrededor de cada grano de arena y en la superficie a pocos centímetros de la arena fina. La población está formada de algas, bacterias, protozoos e invertebrados pequeños. Cuando el agua contaminada por microbios es vertida en el KAF los organismos depredadores que residen en la capa de biofilm consumirán los agentes patógenos, (Ngai and Murcott, 2005).

2.7.1.3. Remoción de hierro y turbiedad.

Las aguas subterráneas que contienen hierro normalmente toman un color naranja cuando entran en contacto con el oxígeno al ser bombeadas hacia la superficie ambiente. En el filtro KAF la mayoría de las partículas de hierro son retenidas en los pequeños espacios entre las partículas de la arena fina a unos pocos centímetros de la superficie. Además, el

agua subterránea podría contener otras partículas de polvo finas en suspensión a veces (por ejemplo: turbiedad). Cuando esta agua es vertida en el filtro, la mayoría de las partículas de hierro y la turbiedad son atrapadas en la superficie de la arena fina por medios físicos. La investigación de campo por MIT y ENPHO, indica que la remoción de hierro y turbiedad está entre 93% a 95% o más. Otros estudios independientes muestran que entre 90% a 99 % de hierro y turbiedad pueden ser retirados, (Ngai and Murcott, 2005).

La remoción de hierro es deseable porque la remoción eficaz de hierro es una condición indispensable, para la remoción eficaz de arsénico. Por lo tanto, si el hierro es encontrado en el agua filtrada, entonces es muy probable que el arsénico sea encontrado también (Ngai and Walewijk, 2003).

2.7.1.4. Tasa de filtración.

La tasa de filtración del KAF es de 15-20 litros por hora (L/h). Una tasa de filtración mayor a los 30 L/h, puede comprometer la eficiencia de remoción del arsénico, hierro, patógenos y turbiedad. Una tasa de filtración menor de 5 L/h, puede ser un inconveniente para el usuario. La Organización Mundial de la Salud recomienda como mínimo 7.5 litros por persona por día (Lppd) para la salud básica y la higiene. Un filtro KANCHAN que funcione durante 12 horas por día a razón de 15 L/h, puede producir un volumen de agua de 180 litros al día suficiente para suplir las necesidades de agua para una familia de 24 personas, (Ngai and Murcott, 2005).

2.7.1.5. Mecanismo de filtración lenta en la remoción de arsénico.

En los filtros las máximas concentraciones de hierro son encontradas en la superficie de la arena fina, es decir en la superficie, (figura 5). Esto es probablemente debido a que las partículas son incapaces de entrar en los pequeños espacios de la capa de arena fina, (Ghimire B. 2005). En las profundidades inferiores de la capa de arena las concentraciones de hierro son estables a valores similares, solo con pequeñas fluctuaciones atribuidas a las concentraciones de hierro natural de la arena o errores de laboratorio.

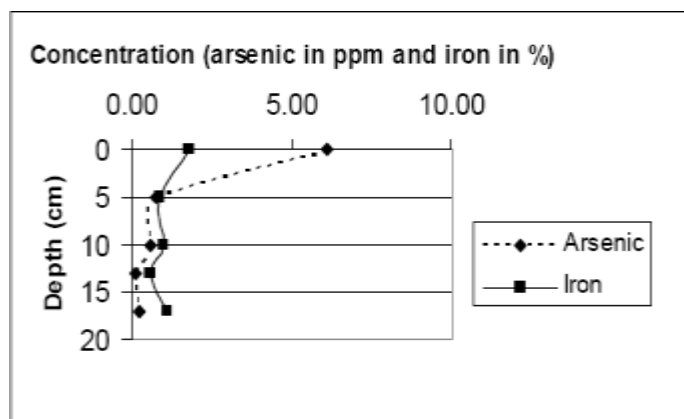


Figura 5. Profundidad de la capa de arena vs. Concentración de hierro (%) y concentración de arsénico (ppm). (Tomado de Ghimire, 2005).

Mayormente, la proporción de hierro-arsénico es alto en la superficie de la arena y baja en las profundidades inferiores de la arena. La alta proporción de hierro-arsénico sugiere que el arsénico adsorbido por las partículas de hierro es atrapado en la superficie de la arena sin penetrar en las profundidades inferiores, (Ghimire, 2005).

a. Tamaño y distribución del grano.

Las propiedades físicas de la arena, a saber, tamaño y distribución del grano, porosidad y permeabilidad no permiten que las partículas de hierro y arsénico penetren en la capa de arena fina, (Ghimire, 2005). Para el KAF la arena fina tiene que ser menor de 1mm, arena media de 1-6mm y grava de 6-15mm.

b. Porosidad.

Para el KAF la porosidad de la arena fue del 36% o sea que de 100 mL de arena, 36 mL de agua fueron suficientes para ocupar los espacios vacíos, (Ghimire, 2005).

c. Permeabilidad.

Para el KAF la permeabilidad determinada debe ser de $3,61 \times 10^{-2}$ según formula de Allen Hazen, $2,22 \times 10^{-2}$ de acuerdo a la ecuación de Kozeny-Carman y $4,74 \times 10^{-2}$ de acuerdo a Ley de Darcis, (Ghimire, 2005).

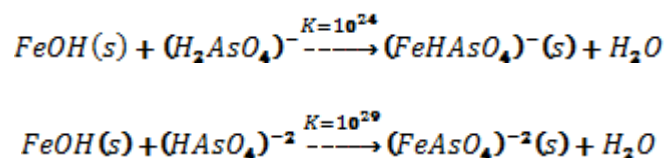
2.7.2. SONO filter.

El sistema de filtración del SONO filter fue probado extensivamente y verificado su tecnología por varios proyectos ejecutados por el Gobierno de Bangladesh. Elimina el arsénico (III) del agua subterránea sin un tratamiento químico previo, obteniendo agua baja en calcio y hierro por lo tanto el sabor es agradable al beber. (HUSSAM, *et al.*, 2007).

Los SONO filter adsorben el arsénico a menos de 10 µg/l, con un rango de entrada de 32 hasta 2,423 µg/L de arsénico total. La matriz del compuesto de hierro (CIM) en combinación con la arena, el carbón de leña y un arreglo optimo de los materiales, permite que el SONO filter remueva arsénico, hierro, manganeso y mucha otras especies inorgánicas. (HUSSAM, *et al.*, 2007)

No requiere operación y mantenimiento especial con excepción del reemplazo de la capa superior de la arena, cuando el flujo de agua disminuye, teniendo una vida útil el filtro de 5 años, es decir de uso continuo. (HUSSAM, *et al.*, 2007)

El SONO filter quita las especies de arsénico principalmente por las reacciones de complejación en la superficie de una matriz férrica compuesta, especialmente fabricada (CIM, por sus siglas en ingles), (HUSSAM, *et al.*, 2007), estas son las reacciones:



El filtro no necesita la aplicación de productos químicos, no se regenera, ni produce residuales tóxicos y produce diariamente entre 20-30 L/hora de agua tratada, suficiente para las necesidades de tomar y cocinar de 1-2 familias. (HUSSAM, *et al.*, 2007).

En agua subterráneas con pH entre 6.5-7.5 el arsénico está presente en dos estados de oxidación Arsénico (III) en H_3AsO_3 y Arsénico (V) en $(H_2AsO_4)^-$, $(HASO_4)^{-2}$. El SONO filter fue desarrollado para remover las tres especies de arsénico anteriores, dado que en la mayoría de las fuentes de agua subterráneas de Bangladesh se encuentra en un 50% la especie H_3AsO_3 y el otro 50% se divide entre $(H_2AsO_4)^-$ y $(HASO_4)^{-2}$. (HUSSAM, *et al.*, 2007)

2.7.2.1. Materiales y funciones características.

Una lista de los materiales básicos y funciones características del SONO filter - MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935,2002, se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones generales de los materiales usados en SONO Filter, función y construcción.

MATERIAL	FUNCIONES Y CARACTERISTICAS	METODO DE CONSTRUCCION Y DISPONIBILIDAD
Especificaciones generales del filtro: Balde superior: 45 L, diámetro: 46/44 cm, peso: 1.5 kg; Balde inferior: 33 L, diámetros 38/36 cm, peso: 1kg. Dimensión: Altura/peso/largo: 1.22/0.42/0.45 metros, peso total 56 kg. Tasa de flujo: 20-30 L/h continuos.		
Balde superior (32 kg).		
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg Composición (1.5%-2%, 95% SiO ₂ , 5% otros metales oxidados).	CRS es un material inactivo usado como medio para retener partículas, dispersar, estabilizar flujo y proveer estabilidad mecánica. En aguas subterráneas con alto contenido de hierro soluble en este medio es oxidado y precipitado como Fe(OH) ₃ soluble.	CRS es obtenido de ríos locales y deber ser lavado antes de usar.

Matriz compuesta de hierro (CIM) 5-10 kg Composición (Fe 92% - 94%, C 4% - 5%, SiO ₂ 1% - 2%, S, P 1% - 2%).	CIM es una superficie activa donde se da la complejación e inmovilización del arsénico inorgánico y otros metales cationicos tóxicos. Es un producto poroso que con el uso se vuelve más encendido y produce partículas menos finas para la estabilidad del filtro.	CIM es fabricado de hierro. Primeramente son fuertemente lavados, secados y tratados con ácidos de calidad para romper la formación HFO en una matriz de hierro férrico.
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg, y trozos de ladrillo (BC: Sílice 55%, Aluminio 30%, Oxido de hierro 8%, Magnesio 5%, Limo 1% y otros materiales 1%) 2.5 kg.	CRS y BC son un material inactivo con similar función. La combinación de ambos materiales es usado como protección y permitir el libre flujo hacia los tubos de salida.	Son obtenidos localmente y deben ser lavados y desinfectados antes de usar.
Balde inferior (25 kg.)		
Arena de río gruesa (CRS) 10 kg.	Similar a la anterior. En este medio se retiene el hierro residual del CIM que precipita en forma de HFO. El periodo de vida del filtro puede ser estimado por el hierro residual que precipita del balde superior.	Similar al anterior.

Carbón de madera (WC).	WC es conocido por adsorber sustancias orgánicas (componentes que causan mal olor, residuos de plaguicidas, etc.). WC es pasivo frente al arsénico pero es importante para obtener agua de beber de mejor calidad.	WC es obtenido del carbón usado para cocinar. Es obtenido en mercados y ventas locales.
Arena de río fina (FRS) 9 kg, y trozos de ladrillo (BC) 3.5 kg.	FRS es un medio de filtración que retiene las partículas más finas. BC son usados para estabilizar el flujo en el medio.	Ambos son obtenidos localmente y deben ser bien lavados antes de usar.
Otros materiales.		
Balde de plástico de 40 L.	Baldes contenedores. Son usados balde de plástico polipropileno de alta densidad.	Obtenidos localmente en mercados y ventas. Los baldes son con tapa, el inferior debe admitir la colocación de la llave reguladora de flujo.
Control de flujo.	El control de flujo mantiene el tiempo de residencia para obtener una óptima remoción de arsénico. Estos traen especificaciones de fábrica.	Estos accesorios se encuentran en plástico y metal en ferreterías locales.
Estante metálico.	Soporta los baldes.	Puede ser hecho localmente.

Fuente: Hussam and Munir, 2005

2.7.2.2. Mecanismo de remoción del arsénico.

El principal material activo en el SONO filter es el CIM, el cual es una masa hecha de hierro, a través de un proceso que permite mantenerla activa y estable durante años. El CIM remueve arsénico cuantitativamente, a través de posibles reacciones químicas presentadas

en la tabla 4. El Espectroscopio Infrarrojo (IRS) y los Rayos X para absorción extendida de partículas finas (EXAFS), evidencian que el arsenato y arsenito tienen forma BIDENTATE y superficie binuclear que le permite formar complejos con el FeOH ó Fe(OH)₃ (hidróxido férrico), donde la especie predominante es fuertemente inmovilizada en la superficie del hierro. (HUSSAM, *et al.*, 2007).

Las especies de Arsénico (III) son oxidadas a especies de Arsénico (V) por el oxígeno activo O₂⁻, el cual es producido por oxidación del hierro soluble Fe(II) con oxígeno disuelto. (HUSSAM, *et al.*, 2007).

Tabla 4. Posibles reacciones fisicoquímicas en diferentes partes del proceso de filtración en el SONO filter.

SITIO DE REACCIN	REACCIÓN
Capa superior: Oxidación de Arsénico(III) (Ecuaciones son balanceadas por reacción de especies).	$\text{As(III)} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{As(IV)} + \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{As(III)} + \text{CO}_3^- \rightarrow \text{As(IV)} + \text{HCO}_3^-$ $\text{As(III)OH}^- \rightarrow \text{As(IV)}$ $\text{As(IV)} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{As(V)} + \text{O}_2^-$
Superficie del Balde: Oxidación del hierro soluble. (Oxidación de ferroso a férrico a través de especies de oxígeno activo).	$\text{Fe(II)} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^- + \text{Fe(III)OH}_2^+$ $\text{Fe(II)} + \text{O}_2^- \rightarrow \text{Fe(III)} + \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{Fe(II)} + \text{CO}_3^- \rightarrow \text{Fe(III)} + \text{HCO}_3^-$
CIM: Hidróxido férrico (HFO) Fe (III) complejación y precipitación.	$\text{FeOH} + \text{Fe(III)} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe(OH)}_3 \text{ (s, HFO)} +$ $\text{FeOH} + 3\text{H}^+ \text{ donde (FeOH es superficie de hierro hidratado)}$
CIM-HFO superficie. Superficie de complejación y precipitación de especies de Arsénico (V).	$\text{FeOH} + \text{AsO}_4^{3-} + 3 \text{H}^+ \rightarrow \text{FeH}_2\text{AsO}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{FeOH} +$ $\text{AsO}_4^{3-} + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{FeHASO}_4^- + \text{H}_2\text{O} = \text{FeOH} + \text{AsO}_4^{3-} +$ $\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe AsO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeOH} + \text{AsO}_4^{3-} \rightarrow \text{FeOH AsO}_4^{3-}$
En los dos Baldes: Precipitación de otros metales. (Precipitación del arsenato con otros iones de metales solubles).	$\text{M(III)} + \text{H AsO}_4^{2-} \rightarrow \text{M}_2 (\text{HASO}_4)_3 \text{ (s), M=Fe, Al, M(II)}$ $+ \text{HASO}_4^{2-} \rightarrow \text{M(HASO}_4) \text{ (s) y otros arsenatos}$ $\text{M= Ba, Ca, Cd, Pb, Cu, Zn y otras trazas de metales}$
CIM y el medio filtrante de Arena. La reacción de la superficie del hierro con la arena produce una estructura solida porosa con un buen mecanismo de estabilidad para el filtro conocida como Solido CIM.	$= \text{FeOH} + \text{Si(OH)}_4 \rightarrow = \text{FeSiO(OH)}_3 \text{ (s)} + \text{H}_2\text{O}$ $= \text{FeOH} + \text{Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_5^- + \text{H}^+ \rightarrow = \text{Fe Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_5 \text{ (s)} + \text{H}_2\text{O}$ $= \text{FeOH} + \text{Si}_2\text{O}_2(\text{OH})_5^- \rightarrow = \text{FeSi}_2\text{O}_3(\text{OH})_4^- \text{ (s)} + \text{H}_2\text{O}$ $= \text{FeOHAsO}_4^{3-} + \text{Al(III)} \rightarrow = \text{FeOHAsO}_4\text{Al (s)}$ $= \text{FeOHAsO}_4^{3-} + \text{Fe(III)} \rightarrow = \text{FeOHAsO}_4\text{Fe(s)}$ $= \text{FeOH.HASO}_4^{2-} + \text{Ca(II)} \rightarrow = \text{FeOH.HASO}_4\text{Ca (s)}$

Fuente: Hussam and Munir, 2005

Cuando las especies de Arsénico (V) (H_2AsO_4^- y HAsO_2^-) son removidas por la reacción superficial de complejación sobre la superficie del hierro hidratado (FeOH) un nuevo (FeOH) es generado en el sitio cuanto más agua es filtrada, (Hussam and Munir, 2007).

2.7.2.3. Remoción de otros elementos en el agua.

En combinación con la matriz de compuesto de hierro (CIM), arena, carbón y un óptimo arreglo de los materiales, el SONO filter puede remover arsénico, hierro, magnesio y muchas otras especies inorgánicas presentes en el agua para consumo humano. En las pruebas realizadas en Bangladesh se obtuvo una remoción de menos de 10 $\mu\text{g/L}$ de un rango de concentración encontrado de 32 - 2,423 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total. El hierro soluble se removió por debajo de 0.26 mg/L de una concentración de hasta 21 mg/L . El material del CIM gastado y desechado no es tóxico porque el hierro-arsénico forma una masa sólida que no lixivia al subsuelo, (Hussam and Munir, 2007).

2.8. Origen de la contaminación con arsénico en Nicaragua.

Se ha estudiado la hipótesis de que el origen de la contaminación con arsénico del agua subterránea en Nicaragua, está influenciado por estructuras mineralizadas o alteradas hidrotermalmente en los alineamientos tectónicos paralelos a la depresión de Nicaragua.

La zona de Santa Rosa del Peñón se encuentra asentada sobre una caladera volcánica antigua que fue rellenada con depósitos aluviales resientes. En los alrededores de Santa Rosa del Peñón se encuentran rocas andesíticas y dacíticas del Coyol Inferior (Tmca, Tmcd). Un sistema de fallas con dirección Noreste-Suroeste y Noroeste-Sureste circunda y cruza el poblado de Santa Rosa del Peñón. El poblado se encuentra entre el extremo Noroeste de una veta de cuarzo aurífera y un yacimiento de yeso al oeste (Estrada, 2003).

Sin embargo, las altas concentraciones en arsénico no pueden explicarse por un aumento anómalo del gradiente geotérmico y no pueden correlacionarse únicamente con áreas hidrogeotermales, (UNICEF, 2004).

La temperatura del agua de los manantiales resultaron con valores ligeramente por encima del los 30° C, que evidencia un termalismo residual en la zona. El pH es ligeramente ácido con un promedio de 6.87. Los valores de arsénico encontrados oscilaban entre los 10.5

$\mu\text{g/L}$ y $95.0 \mu\text{g/L}$ con un promedio de $19.7 \mu\text{g/L}$. Los resultados indican que principalmente predomina el arsénico pentavalente con un promedio de $14.2 \mu\text{g/L}$ (UNICEF, 2004).

En la zona existe una buena correlación entre el arsénico y la conductividad eléctrica ($R = 0.67$) y entre la conductividad eléctrica y la altitud del nivel del agua muestreada ($R = 0.56$). Existe una buena correlación entre el Arsénico total y la conductividad eléctrica ($R = +0.67$) y entre la conductividad eléctrica y la altitud del nivel del agua muestreada ($R = -0.56$).

Tabla 5. Coeficiente de correlación parámetros fisicoquímicos en El Charco y Santa Rosa del Peñón. (Tomado de UNICEF, 2004).

N=16	As Total	Conductividad	Temperatura	pH	Eh	Profundidad	Altitud del nivel del agua
As Total	1.00						
Conductividad	0.67	1.00					
Temperatura	-0.20	-0.45	1.00				
pH	0.42	0.48	-0.30	1.00			
Eh	-0.06	-0.29	0.08	-0.55	1.00		
Profundidad	-0.06	-0.20	0.28	-0.15	0.45	1.00	
Altitud del nivel del agua	-0.39	-0.56	0.04	-0.48	0.26	0.36	1.00

Los coeficientes de correlación entre arsénico y conductividad eléctrica muestra que las correlaciones más altas, entre 0.50 y 0.67, se encuentran en las zonas con índice de peligrosidad alto a muy alto (Cruz de la India, Kinuma, El Charco-Santa Rosa del Peñón), (UNICEF, 2004).

Existe un aumento de la conductividad eléctrica, o sea del contenido de minerales disueltos, con una disminución de la altitud, o sea en dirección del flujo del agua subterránea. Eso demuestra que en la zona de estudio la mayoría de los puntos estudiados pertenecen al mismo acuífero (UNICEF, 2004). La figura 6 muestra la variación de la conductividad

eléctrica del agua en función del nivel estático del punto de agua en la zona de El Charco y Santa Rosa del Peñón.

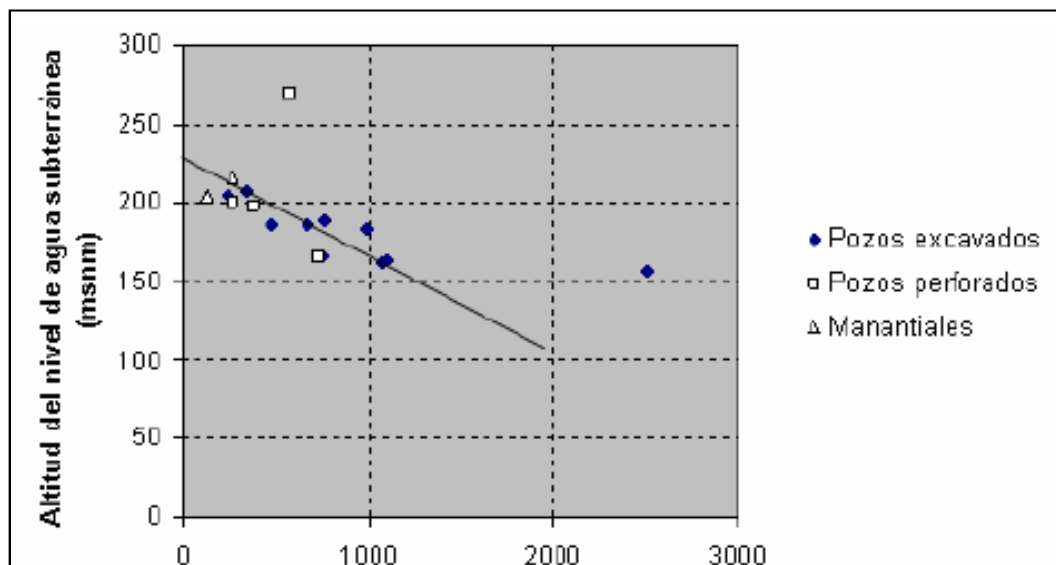


Figura 6. Relación de la altitud del nivel de agua y la conductividad eléctrica (Tomado de UNICEF, 2004).

UNI-PIDMA, 2002, había mostrado que el arsénico está presente en ambientes oxidantes ($Eh > 400$ mV) con pH entre 6 y 8. Por lo tanto las especiaciones pentavalentes predominan. El predominio de Arsénico (V) es confirmado con el estudio del UNICEF, 2003. En la zona de Santa Rosa del Peñón predomina la especie pentavalente $(H_3AsO_4)^{-2}$, (UNICEF, 2004). La figura 7 presenta la especie de arsénico en la zona de estudio en el diagrama pH-Eh.

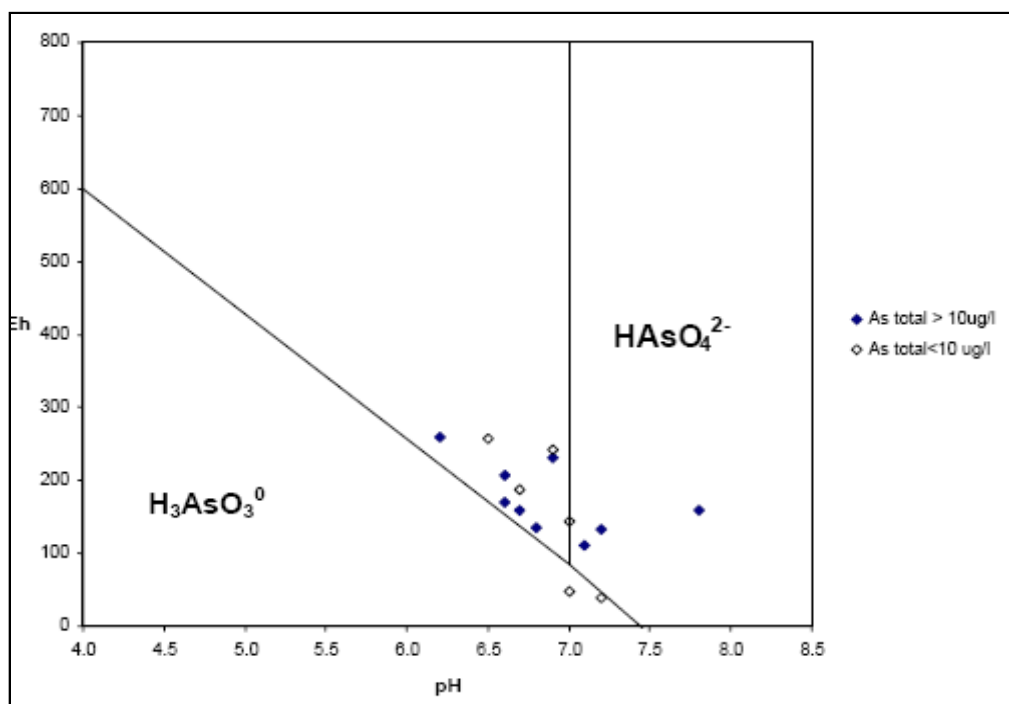


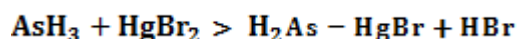
Figura 7. Especies de arsénico presente en la zona de El Charco y Santa Rosa del Peñón. (Tomado de UNICEF, 2004).

2.9. Tecnología utilizada para la detección de arsénico.

Hasta hace poco tiempo la determinación de arsénico en el agua estaba basada en los estándares determinados por equipo analítico a nivel de laboratorio, en este caso el horno de grafito con Espectrómetro de Absorción Atómica (AAS), lo cual dificultaba el análisis de arsénico en aquellas regiones que distaban mucho de Laboratorio o en el caso muy frecuente no se dispone del AAS. El desarrollo del equipo portátil conocido como ARSENATOR diseñado por el Prof. Walter Kosmus del Departamento de Análisis Químico de la Universidad de Graz en Austria y probado por el Imperial College de Londres en Inglaterra, vino a facilitar el análisis de arsénico *in-situ*, permitiendo identificar las fuentes de agua contaminadas y las poblaciones afectadas por arsénico en regiones aisladas. (www.wagtech.co.uk, 2008).

El ARSENATOR está formado por dos parte principales: el cuerpo principal con el mecanismo electrónico para la lectura y la otra parte que la compone un Erlenmeyer, donde se produce la reacción y se retiene el gas producido por medio de papel filtro. La medición

se basa en la generación de arsénico AsH_3 y la subsecuente detección vía reacción con bromuro de mercurio, esto es conocido hace décadas como el Método Gutzeit. El arsénico reacciona con el bromuro de mercurio de acuerdo a la reacción siguiente, (www.wagtech.co.uk, 2008).



La ecuación de la reacción producida no es exactamente conocida. En el producto se observa un color amarillo que va tomando un color marrón a medida que avanza la reacción. En el método colorimétrico de Gutzeit, también conocido como el método de mancha de mercurio-bromuro, la corriente de gas conteniendo el arsénico se impregna en un papel filtro colocado en un pequeño tubo de vidrio sobre el recipiente de reacción. Al final de la reacción la longitud de la zona coloreada deber ser proporcional a la cantidad de arsénico reducido dentro del frasco de reacción. La estimación de la longitud de onda en la zona coloreada en el filtro se basa en la medida de la absorción de luz, realizada por un diodo que emite luz en el rango de longitud de onda adecuada y un fotodiodo registra la transmisión, (www.wagtech.co.uk, 2008).

La confiabilidad de las mediciones del ARSENATOR, fueron realizadas por el Dr. Peter Swash de la Royal School of Mines, Imperial College, Londres, Reino Unido, auspiciado por el Ministerio de Salud Pública, la UNICEF y el equipo de Agua y Sanidad de Yangon, con el fin de validarlo como un instrumento que puede ser usado para pruebas de determinación de concentración de arsénico en el campo en Proyectos de Mitigación de Arsénico, (www.wagtech.co.uk, 2008).

La evaluación realizada por el Dr. Swash concluye que el ARSENATOR aporta resultados cuantitativos precisos de la concentración de arsénico total de muestras tomadas *in-situ*. Previo al inicio de cada actividad en el campo, es necesario evaluar el funcionamiento del equipo tomando como referencia ejemplos de concentraciones de arsénico que han sido determinadas por el AAS. Para que el ARSENATOR sea aceptado como un instrumento confiable, debe obtenerse una correlación 1:1 entre dos series de datos. Las recomendaciones del Dr. Swash para el uso son las siguientes, (www.wagtech.co.uk, 2008).

- Existe oportunidades potenciales para que surjan errores de operación, lo cual es la razón de pobre precisión y resultados erróneos.
- Previo a la realización de mediciones de concentración de arsénico en el campo, es necesario evaluar el equipo con estándares conocidos, condiciones de las baterías y la experiencia del operador.
- Es recomendable que el 2% de los resultados de campo sean verificados en el Laboratorio con el AAS, especialmente en regiones con concentraciones de arsénico total entre 60 µg/La 80 µg/L.
- Un análisis estadístico debe ser realizado para dar seguimiento a los resultados de campo.
- La supervisión del uso del equipo debe ser permanente, especialmente durante la calibración del equipo.

Errores de operación más comunes:

- Colocación retardada de los tres filtros en la trampa triple, una vez retirado del frasco de almacenamiento de filtros.
- Incorrecta estandarización del equipo.
- Incorrecta colocación de los filtros en los slide. Slide que contienen los filtros en la trampa.
- Tiempo insuficiente de reacción.

El sistema digital Arsenator es ahora reconocido como la opción más confiable y precisa para pruebas de campo, siendo usado en regiones alejadas por organizaciones como la UNICEF y la OMS. Se obtienen resultados en 20 minutos, y dentro de rango entre 2 µg/La 100 µg/L. No puede ser utilizado para realizar mediciones de concentración de arsénico por encima de 100 µg/L. Además es ambientalmente amigable, (www.wagtech.co.uk, 2008).



Figura 8. El Wagtech Arsenator. Tomado de <http://www.wagtech.co.uk/products/water-and-environmental/water-test-kits/arsenator>.

III. DISEÑO METODOLOGICO.

El propósito de este estudio fue evaluar en Nicaragua el comportamiento de los filtros KANCHAN Y SONO filter, removiendo arsénico en aguas subterráneas con concentraciones que sobrepasan los 10 µg/l, admitidos para agua potable por la norma de calidad de agua del país. Estas dos tecnologías son de uso domiciliario y fueron diseñadas para la remoción de arsénico en agua para consumo humano, a base hierro y arena. Han sido probadas exitosamente y ampliamente en los países de Nepal y Bangladesh, respectivamente.

3.1. Área de estudio.

Los filtros se construyeron, instalaron y operaron en las instalaciones de los laboratorios del CIEMA-UNI para facilitar la operación y análisis de las variables de estudio. La fuente de agua seleccionada es un pozo perforado equipado con bomba de mecate, el pozo es de uso público y abastece a un total de 10 familias en la comunidad de Linda Vista en el municipio de Santa Rosa del Peñón, del departamento de León, Ver anexo E, galería de fotos, foto 1.

Durante la visita de reconocimiento en el pozo seleccionado se detectó una concentración de arsénico total de 73 µg/L de acuerdo a medición realizada con el equipo portátil ARSEATOR. Este pozo se encuentra en el centro de la comunidad de Linda Vista y es de uso público.

3.2. Programa de trabajo.

El estudio se desarrolló en cuatro etapas:

Etapas 1: Identificación de la Fuente y Construcción de Filtros:

Este período comprendió del 1 al 30 de octubre de 2008 y abarcó las actividades siguientes:

Revisión de la documentación bibliográfica.

Consulta a expertos del CIEMA-UNI.

Diseño y construcción de los filtros.

Identificación de la fuente de agua dentro del rango de concentración de 60 µg/L- 80 µg/L de arsénico.

Etapas 2: Evaluación del Comportamiento de los Filtros:

En el periodo comprendido de octubre 2008 a enero 2009 se evaluaron los filtros, se filtró agua cruda en tres ciclos de 10, 20 y 30 Lpd, cinco días a la semana durante tres meses. El agua contaminada a filtrar en la semana, se recolectaba del pozo seleccionado en dos recipientes plásticos los cuales se transportaban en una camioneta del CIEMA- UNI.

Durante las carreras de filtración se registraban diariamente los valores de los parámetros siguientes:

- Concentración de arsénico en el agua filtrada.
- Tasa de filtración.
- Temperatura.
- Conductividad eléctrica.
- pH.
- Potencial Redox.
- Turbiedad
- Hierro
- Fosfato

Etapas 3: Procesamiento y Presentación Preliminar de Datos:

Este periodo comprendió del 1 de abril al 30 de junio de 2009. Los datos procesados preliminares se presentaron el día 2 de Julio de 2009 ante representantes de la UNI, Instituciones de Gobierno y Organismos no Gubernamentales vinculadas al sector de agua potable y saneamiento del país.

Etapas 4: Redacción de documento y conclusiones del estudio:

En el periodo comprendido entre Julio y Diciembre de 2009, se procedió a la redacción del documento y procesamiento de los resultados, conclusiones y recomendaciones del trabajo investigativo el cual forma parte de la presente Tesis para optar al grado de Máster en Ingeniería Ambiental (Ciclo 2004-2005) del CIEMA – UNI.

3.3. Modelos experimentales.

Se construyeron los filtros KANCHAN y SONO filter, siguiendo las mismas características y arreglo de material del diseño original descrito en la bibliografía encontrada en Internet. Excepto, para el caso del SONO filter, donde la matriz de compuesto de hierro, componente básico del filtro, fue sustituido por clavos de hierro debido a que este compuesto no se encuentra en el mercado nacional. Ver anexo E, galería de fotos, foto 1, 2 y 3.

Los filtros fueron diseñados como filtros de flujo intermitente. El agua cruda es vertida en el filtro y el agua filtrada sale a tasa de filtración baja. La circulación del agua en los filtros no es continua; depende del nivel de agua por encima de la capa de arena. Obviamente, la tasa de filtración del agua de los filtros es más alta cuando hay un nivel de agua máximo por encima de la capa de arena y la tasa de filtración del agua disminuye cuando el nivel del agua decrece.

Los dos filtros fueron instalados y operados en el Centro de Investigación y Estudio en Medioambiente del CIEMA-UNI, Managua. El filtro KANCHAN tuvo un costo de materiales de C\$432 (córdobas) y el SONO filter de C\$654 (córdobas). Ver en anexo F, Presupuesto y planos constructivos del filtro KANCHAN y SONO filter.

3.3.1. Filtro KANCHAN.

El filtro KANCHAN fue desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en colaboración con Environment and Public Health Organization ENPHO y Rural Water Supply and Sanitation Support Program RWSSSP de Nepal, basado en siete años de investigación interdisciplinaria en laboratorios y estudios de campo en comunidades rurales de Nepal (Ngai et al, 2006). Existen cuatro configuraciones (Walewijk *et al*, 2004) del filtro KANCHAN que ha desarrollado el Instituto de Tecnología de Massachusetts en colaboración con ENPHO y RWSSSP:

- ✓ Concrete Square.
- ✓ Concrete Round.
- ✓ Plastic Hilltake.
- ✓ Plastic Gem505.

La configuración escogida para el estudio de evaluación del comportamiento del filtro KANCHAN es la versión Plastic GEM 505. El filtro KANCHAN versión GEM 505 se compone de dos unidades, la primera de remoción de arsénico compuesta de una pana con orificios de salida en la parte inferior que contiene una aglomeración de clavos oxidados previamente donde se realiza la adsorción del arsénico por acción del hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). La segunda unidad de retención del complejo hierro-arsénico y patógenos lo conforman un balde plástico con filtro lento de arena fina, media y grava en su interior, ver figura 9 componentes del filtro KANCHAN.

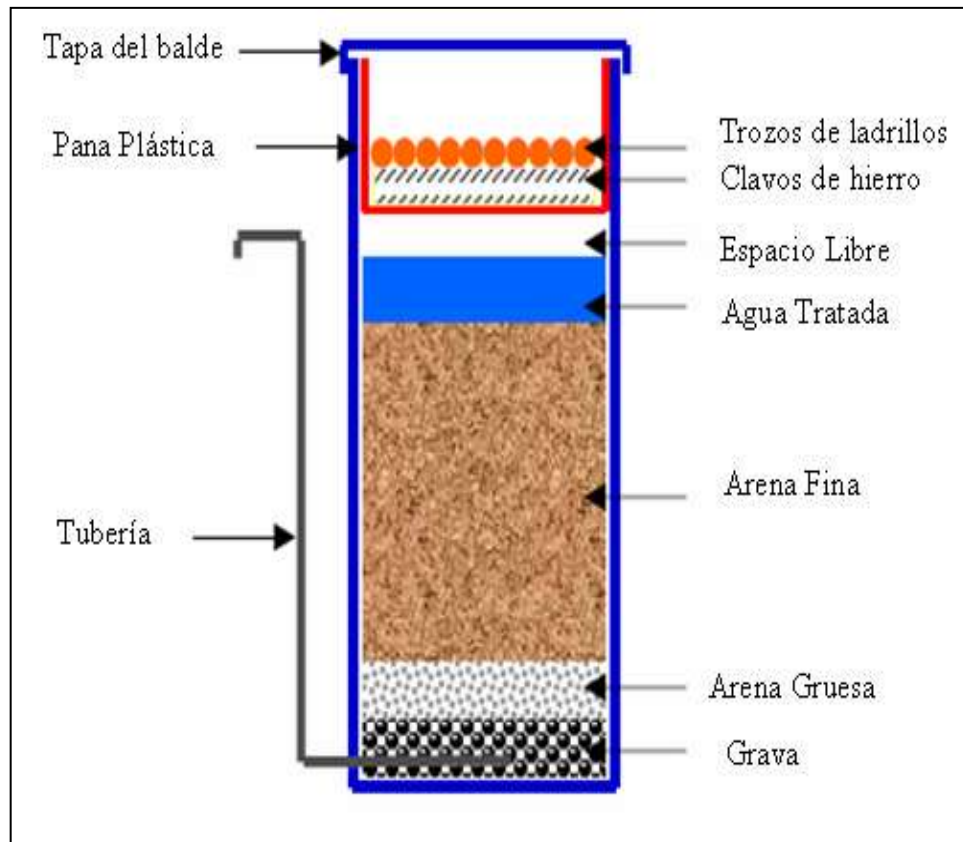


Figura 9. Componentes del filtro KANCHAN. (Adaptado de Construction, Installation, Operation and Troubleshooting of KANCHANTM Arsenic Filter (KAF) Gem505 Version).

3.3.2. SONO filter.

Los materiales usados en las especificaciones generales del SONO filter contiene un recipiente superior de 45 litros, que en su arreglo está compuesto de arena media y una matriz compuesta de hierro, las partículas gruesas del filtro de arena imparten estabilidad mecánica, mientras que la matriz compuesta de hierro remueve el arsénico inorgánico. Un recipiente inferior de 23 litros conteniendo arena media, arena fina, carbón de leña y ladrillos de barro. El agua fluye en este segundo recipiente, donde se filtra una vez, a través de arena gruesa de río, después entra en contacto con el carbón de leña de madera para remover la materia orgánica y finalmente a través de la arena fina de río y trozos de ladrillos para remover partículas finas y estabilizar el flujo del agua, ver figura 10 Componentes del SONO filter.

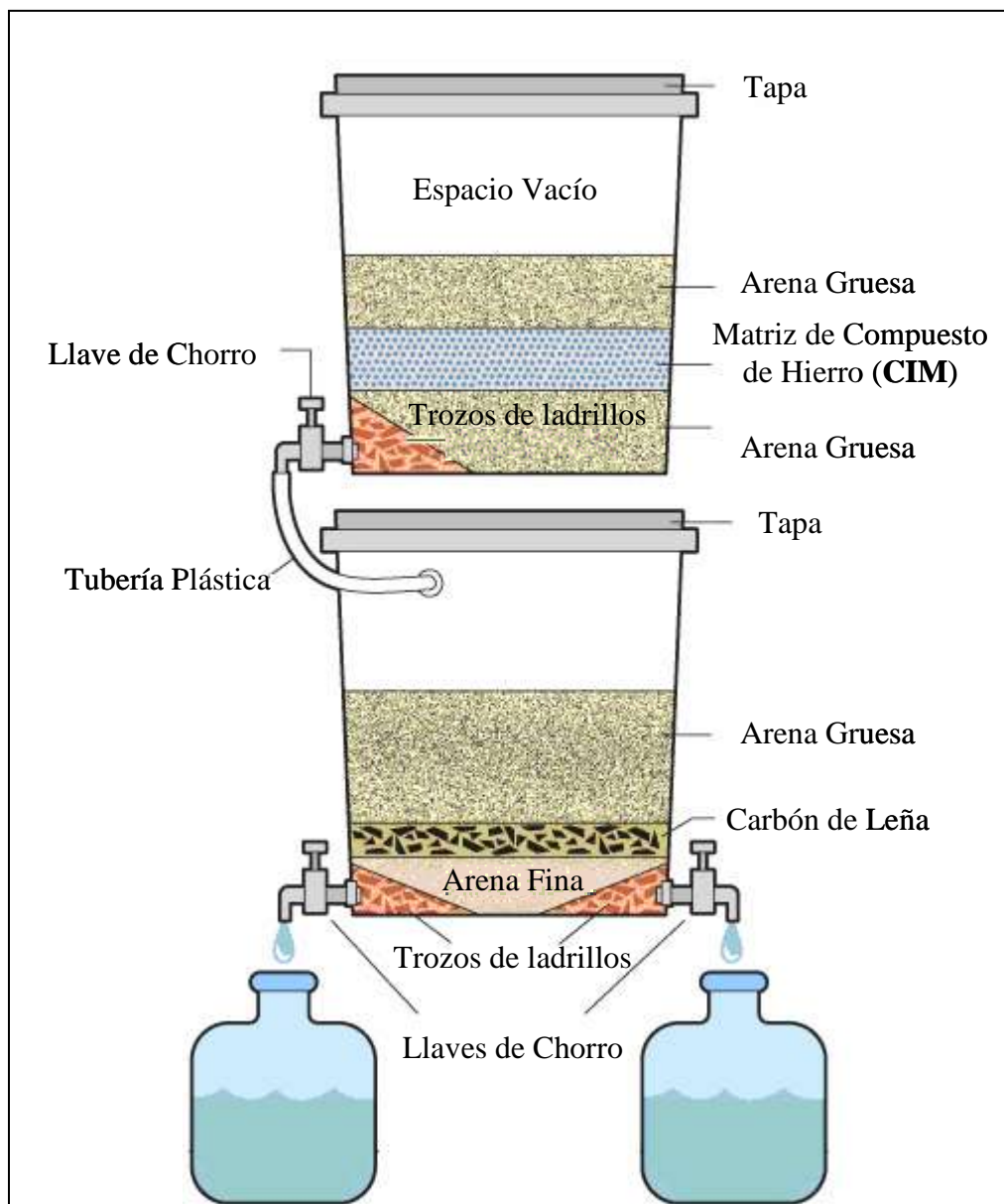


Figura 10. Diagrama del SONO filter, Modelo SF – TWIN, Patente 1003935, 2002. (Tomado de Hussam nd Munir, 2007).

3.4. Método Experimental.

Haciendo uso de materiales locales para la configuración, los filtros fueron construidos siguiendo el procedimiento que se detalla a continuación.

3.4.1. Configuración de los filtros.

Todos los materiales para la configuración de los filtros así como: grava, arena media, arena fina, ladrillos de barro, clavos, baldes plásticos y accesorios PVC que se utilizaron para su construcción, se obtuvieron localmente en ferreterías y mercados de la ciudad de Managua y sus alrededores.

3.4.1.1. Unidad principal.

Los baldes plásticos forman las unidades principales de cada filtro. Debido a la presión ejercida por los materiales y el agua en el interior de los mismos, se utilizaron baldes plástico resistente para evitar que se dañen durante la operación del filtro.

El Filtro KANCHAN, está formado por un solo un balde de 45 litros con su tapadera. En la Tabla 6 se detallan las dimensiones del balde.

Tabla 6. Dimensiones del balde KANCHAN

DIMENSIÓN	UNIDAD
Diámetro1 interno (m)	0,32
Diámetro2 interno (m)	0,38
Altura del balde (m)	0,46
Volumen (L)	45

Se utilizó una pana plástico de 10 litros con 2 orificios de 2 mm de abertura en los extremos de la parte inferior. En esta pana se colocan los clavos previamente oxidados y se vierte el agua cruda al momento de operar el filtro.

El SONO filter, lo forman dos unidades principales que son un balde superior de 30 litros y un balde inferior de 25 litros, ambos con tapadera. En la Tabla 7 se detallan las dimensiones de los baldes usados.

Tabla7. Dimensiones de los baldes del SONO filter.

DIMENSIÓN	UNIDAD	
	BALDE SUPERIOR	BALDE INFERIOR
Diámetro1(m)	0,35	0,33
Diámetro2 (m)	0,31	0,29
Altura (m)	0,35	0,33
Volumen (L)	30	25

En el balde superior se coloca una pana plástica de 10 litros con 2 orificios de 2 mm de abertura en los extremos de la parte inferior. En esta pana es vertida el agua cruda al operar el filtro. No es parte de la configuración original del filtro, es un elemento adicionado con el propósito de regular el flujo de agua en el balde superior. En la Tabla 8 se detallan las dimensiones de la pana del filtro KANCHAN y SONO filter.

Tabla 8. Dimensiones de la Pana.

Concepto	Unidad	Pana Plástica	
		KANCHAN	SONO filter
Diámetro1 interno	m	0,3	0,25
Diámetro2 interno	m	0,38	0,35
Altura	m	0,11	0,14
Volumen	L	10	10

3.4.1.2. Sección de adsorción de arsénico.

Los clavos oxidados proporcionan el hidróxido de hierro para adsorber el arsénico del agua y formar el complejo hierro - arsénico que precipitan al medio filtrante. Los clavos se colocan en una pana de plástico de 10 litros de capacidad con dos orificios de salida de 2 mm, la pana se encuentra suspendida en la parte superior de la unidad principal del filtro KANCHAN.

En el caso del filtro SONO, la adsorción de arsénico se da en el balde superior de 30 litros, el cual contiene los clavos oxidados y por donde pasa el agua contaminada con arsénico.

Debido a la imposibilidad de contar con la matriz de compuesto de hierro del SONO filter, se optó por utilizar 5 kilogramos de clavos de hierro oxidados. Estos se colocaron en el balde superior entre dos capas de arena media.

En ambos filtros se colocaron 5 kilogramos de clavos de 1 pulgada (< 20 mm), no galvanizados previamente oxidados. Para el caso del SONO filter los clavos oxidados sustituyeron la matriz de compuesto de hierro presente en el diseño original.

Para ambos filtros, se utilizaron ladrillos de barro lavados antes de usar, quebrados en trozos, estos fueron colocados sobre los clavos oxidados para atenuar la energía generada por el agua vertida en la pana del filtro KANCHAN. También en el balde superior como inferior del SONO filter se utilizaron pequeños trozos de ladrillos juntamente en la salida del agua usados para estabilizar el flujo en el medio.

3.4.1.3. Tiempo de contacto.

Para el filtro KANCHAN el tiempo de contacto del agua cruda con los clavos oxidados fue de 20 minutos. Los cálculos de la “hidráulica de la pana” determinaron la cantidad y diámetro de los orificios de salida en función del tiempo de contacto requerido, lo cual dio como resultado dos orificios de 2 mm cada uno. En este punto el filtro construido difiere del diseño original del KAF versión GEM 505, que establece abrir en el fondo de la pana 40 orificios (de 2 mm) uniformemente distribuidos (Ngai, 2006).

Igualmente para el SONO filter el tiempo de contacto del agua cruda con los clavos oxidados fue de 20 minutos con la salvedad que el agua entra en contacto con los clavos oxidados en el balde superior y no en la pana. Los cálculos de la “hidráulica de la pana” determinaron la cantidad y diámetro de los orificios de salida en función del tiempo de contacto requerido, lo cual dio como resultado dos orificios de 2 mm cada uno.

Las formulas utilizadas para determinar el número de orificios de la pana en función del tiempo de retención fueron las siguientes:

$$h = kv^2/2g$$

Donde: $k = 1$ (coeficiente de contracción de boquilla adimensional), h = pérdida de carga (m); v = Velocidad del flujo (m/s) y g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

$$V = Q/A$$

Donde: V = Velocidad del flujo (m/s); Q = Caudal de agua (m^3/s) y A = Área (m^2).

$$Q = Vol / T$$

Donde: Q = Caudal de Agua (m^3/s); Vol = Volumen de agua en la pana (m^3) y T = Tiempo de retención (min)

De estas relaciones nos da una ecuación en función del tiempo de retención, la carga de agua, el volumen y el diámetro. Por prueba y error se determina el número de orificios de la pana.

El diámetro es,

$$d = (((Vol / T) \times 4) / ((2 \times g \times h/k)^{1/2} \times 3.1416))^{1/2} \quad (m)$$

La pana de los filtros tiene una capacidad de 10 lts ($0.01006488 m^3$), el tiempo de retención es de 20 min (1200 seg.) y la altura de la pana es de 0.11 m, con estos valores se determinó el diámetro de los orificios:

$$d = (((0.01006488 / (20 \times 60)) \times 4) / ((2 \times 9.81 \times 0.11/1)^{1/2} \times 3.1416))^{1/2} = 2.6962E-03$$

$$d = 2.6962E-03 \text{ m}$$

$$d = 2.70 \text{ mm}$$

Al perforar la pana con un rayo de bicicleta con un diámetro $dr = 2 \text{ mm}$, la cantidad de orificios es igual a:

$$\text{No Orificios} = d / dr = 2.70 / 2 = 1.35 \text{ hoyos}$$

Por tanto la cantidad de orificios en la pana es de dos perforaciones de 2 mm cada una de ellas.

3.4.1.4. Sección de filtración lenta.

Los materiales utilizados en el sistema de filtración tanto para el filtro KANCHAN así como para el SONO filter, fueron los siguientes y se describen a continuación

Grava.

El tamaño de la grava utilizada en el filtro KANCHAN es de 6 - 15 mm de diámetro. Se lavó con agua antes de usar para retirar partículas de polvo y otras impurezas innecesarias. El SONO filter no utiliza grava.

Arena Media.

La arena media utilizada en el filtro KANCHAN y SONO filter es de 3 - 6 mm de diámetro, también se lavó con agua para retirar partículas de polvo y otras impurezas innecesarias.

Arena Fina.

La arena fina utilizada para ambos filtros, fue extraída de un banco de arena ubicado en el sector de Momotombo. En el mismo lugar de extracción se tamizó la arena para seleccionarla con un tamaño < de 1mm. La arena fina fue lavada rigurosamente con agua antes de usar para retirar partículas de polvo y otras impurezas innecesarias.

Para estar seguro de la idoneidad de la arena fina recolectada, se realizó un análisis granulométrico a fin de conocer sus propiedades físicas, a saber, tamaño y distribución del grano. La porosidad y permeabilidad no permiten que las partículas de hierro y arsénico penetren en la capa de arena fina. (Ghimire, 2005).

1. Porosidad.

La porosidad de la arena fue determinada por el método del beaker. Este método se basa en replicar las condiciones del terreno en el laboratorio. La arena seca se puso dentro del beaker y se agregó agua hasta saturar la arena. Este volumen de agua agregada se define como V_v (ml) y el volumen total de arena saturada se define como V (ml). Entonces la porosidad se determinó por la siguiente ecuación:

$$n = V_v * 100 / V$$

En un beaker de 2000 ml de capacidad, se añadió la cantidad de 1000 ml de arena seca, posteriormente con una probeta de 150 ml de capacidad, se vertieron dentro del beaker 404 ml de agua, hasta saturar la arena. La arena se encuentra saturada de agua, cuando el agua ocupa los espacios vacíos de la arena, hasta llegar a la parte superior donde se forma un espejo de agua bastante delgado.

Entonces la porosidad se determinó usando la expresión antes señalada dando una porosidad de:

$$n = (404 \text{ ml} / 1000 \text{ ml}) * 100 = 40.4\%$$

$$n = 40.4\%$$

La Porosidad de la arena se relaciona con su forma: Las arenas redondeadas tienen porosidades que varían entre 40% y 44% y las arenas angulares, porosidades mayores, por lo general entre 42% y 46%. La porosidad varía según el grado de compactación del lecho y la limpieza del mismo. Lechos sucios tienen bajas porosidades y al progresar la carrera de filtración se compactan. Comúnmente a menor porosidad mejor efluente se obtiene.

2. Análisis Granulométrico de la arena

El material granular para el filtro se seleccionó por medio del cernido en tamices, siguiendo la serie estándar americana. Para analizar la muestra se pesó una cantidad 500 g, se cernió en tamices consecutivos y se va obteniendo el tanto por ciento del peso retenido en cada tamiz con relación al total. El resultado se dibuja con el objeto de facilitar las interpolaciones, la forma y pendiente de la curva muestra la graduación de la arena. Ver Tabla 9 granulométrico de la arena.

Tabla 9. Ensaye Granulométrico de la Arena de Cauce Momotombo

No Tamiz	Peso Retenido Parcial (gr)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Que Pasa
16	0.5	0	0	100
30	129.5	26	26	74
50	300	60	86	14
100	54.5	11	97	3
200	15.5	3	100	0
Pasa No 200	0.0	----	----	----
Total	500.0	100	----	----

El análisis granulométrico de la arena de cauce de Momotombo, fue realizado por el laboratorio de materiales y suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI – RUPAP). En anexo A, se pueden ver los resultados del análisis granulométrico de la arena.

El análisis realizado al banco de materiales fue a una muestra puntual, tendiendo como resultado lo siguiente: en el tamiz número 30 (0.590mm) el porcentaje retenido fue de 26%, en el tamiz No 50 (0.297mm) fue de 60%, en el tamiz No 100 (0.149mm) 11% y en el tamiz No 200 (0.074mm) del 3%, cumpliendo con lo establecido en los filtros de que el diámetro de la arena utilizado es menor de 1mm.

Coeficiente de Uniformidad

Allen Hazen sugirió como parámetros básicos para caracterizar los medios granulares, lo que el denominó “Coeficiente de Uniformidad y Diámetro Efectivo”

El Coeficiente de la uniformidad **Cu**, es la razón del 60 al 10% así.

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

D_{60} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 60% (mm)

D_{10} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 10% (mm)

El diámetro efectivo **D₁₀** es la abertura del cedazo ideal que deja pasar el 10%.

Del análisis granulométrico de la arena el $D_{60} = 0.51$ y el $D_{10} = 0.23$, determinándose un valor de Coeficiente de Uniformidad de:

$$Cu = 0.51/0.23 = 2.22$$

$$Cu = 2.22$$

Coeficiente de curvatura

El Coeficiente de curvatura **Cc**. Se define como

$$Cc = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$$

D_{60} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 60% (mm)

D_{30} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 30% (mm)

D_{10} = Abertura del tamiz que dejaría pasar el 10% (mm)

Del análisis granulométrico de la arena el $D_{60} = 0.51$, $D_{30} = 0.425$ y el $D_{10} = 0.23$, determinándose un valor de Coeficiente de Curvatura de:

$$Cc = ((0.425)^2 / (0.23*0.51)) = 1.54$$

$$Cc = 1.54$$

Permeabilidad

La permeabilidad también fue determinada por la fórmula empírica propuesta por Allen Hazen. Para arenas limpias (con menos del 5 % de fino) y el tamaño de D_{10} entre 0.1 y 3.0 mm:

$$k = CD_{10}^2$$

K = Permeabilidad (centímetros / s),

C = constante que varía entre 0.4 a 1.2 con un valor medio de 0.8

D_{10} = el diámetro efectivo (mm).

Del análisis granulométrico de la arena el $D_{10} = 0.23$, determinándose un valor de Permeabilidad de:

$$k = 0.8 * (0.23)^2$$

$$k = 4.23E-02 \text{ cm/s}$$

Carbón orgánico.

En el balde inferior del SONO filter, se colocan 2 kg de carbón de leña. Se seleccionaron trozos de carbón lo más uniforme posible para formar una capa de carbón bien distribuida.

3.4.2. Construcción de los filtros.

Como se indicó anteriormente para esta investigación se construyeron dos filtros un filtro KANCHAN y un SONO filter. En este acápite se detallan el procedimiento y los accesorios de PVC usados para la construcción de los filtros.

3.4.2.1. Accesorios de PVC.

Los accesorios utilizados para la construcción del filtro KANCHAN son:

3 Niples PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ", con dimensiones de 0.10, 0.25 y 0.25m respectivamente.

2 Codos lisos PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "x90° sin rosca.

1 Codo PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "x90° extremo liso y roscado.

2 Empaques de hule de $\Phi \frac{1}{2}$ "

1 Adaptador macho PVC con rosca de $\Phi \frac{1}{2}$ "

1 Tapón liso PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "

Los accesorios utilizados para la construcción del SONO filter son los siguientes:

Balde Superior:

1 Llave de chorro PVC de $\frac{1}{2}$ "

1 Rosca PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "

2 Empaques de hule de $\Phi \frac{1}{2}$ "

0.5m de Manguera plástica flexible de $\Phi \frac{1}{2}$ "

1 Terminales para mangueras.

Balde Inferior:

3 Adaptadores macho de rosca PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "

2 Llave de chorro PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".

2 Rosca PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ "

4 Empaque de hule de $\Phi \frac{1}{2}$ "

3.4.2.2. Oxidación de los clavos.

Los clavos fueron oxidados previos a la construcción de los filtros. Es importante que los clavos estén bien oxidados al momento de introducirlo en los filtros, ya que existe una alta probabilidad de que se obtenga una buena eficiencia de remoción de arsénico a partir de la primera semana de operación del filtro, usando clavos oxidados previamente (Samnang *et al*, 2008). Para acelerar la oxidación de los clavos, estos se colocaron sobre una lámina de zinc, se rociaron periódicamente con agua y se expusieron al aire libre. Una vez que se oxidaron los clavos se procedió a la construcción e instalación de los filtros.

3.4.2.3. Procedimiento de construcción.

Filtro KANCHAN

El filtro KANCHAN, se construyó siguiendo las indicaciones del manual de construcción. En el filtro se utilizó una pana plástica de 10 litros que se coloca en la parte superior del balde. Dentro de la pana están los clavos oxidados los cuales entran en contacto con el agua cruda a filtrar, posteriormente el agua ingresa en el interior del balde a través de 2 orificios de 2 mm cada uno los que se encuentran en la parte inferior de la pana.

Construcción:

- Se cortaron niples de PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ", en longitudes de 0.10m, 0.25m y 0.25m.
- Se hizo un fuego para calentar un niple de tubería de Ho.Go de $\Phi \frac{1}{2}$ " para realizar la perforación al balde.
- Con un rayo de bicicleta caliente se realizaron dos perforaciones pequeñas de 2 mm de diámetro en la parte inferior del niple que va dentro del balde.
- Se colocó el tapón PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " de diámetro al niple que va dentro del balde uniéndolo con el adaptador macho de $\Phi \frac{1}{2}$ " PVC.
- Se trazó una línea a dos pulgadas del fondo del balde y se realizó un agujero de $\Phi \frac{1}{2}$ " por debajo de la línea usando un niple de hierro caliente de $\Phi \frac{1}{2}$ ".

- Se puso el adaptador macho PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ " con su empaque de hule en el agujero del balde. En el niple los dos agujeros deben estar en el fondo (hacia abajo).
- En la parte exterior se unieron los niples y codos al adaptador hembra, conjuntamente con su empaque de hule.
- Las tuberías se sellaron con teflón o pegamento para evitar el goteo.
- En el fondo de la pana se realizaron dos perforaciones de 2 mm de diámetro de forma equidistante.
- Se llenó el balde con agua, verificando que no existiera filtración en la parte exterior en la unión de la tubería.
- Se determinó el tiempo necesario para llenar un recipiente de un litro de agua, el tiempo estimado del llenado debe andar entre 2 y 3 minutos.
- Al no existir filtración y el llenado de un recipiente de un litro de agua se hace entre dos y tres minutos, la construcción se ha completado satisfactoriamente.

Instalación:

- Se construyó una superficie estable bien nivelada donde se colocó el filtro.
- Se agregaron 20 gotas de hipoclorito de sodio a un balde de 10 lts de agua.
- Se puso el agua clorada dentro del balde de 45 lts
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde 6 lts de grava lavada. Suavemente se agregó la grava dentro del filtro, la grava cubrió el tubo de drenaje.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una segunda capa 4 lts de arena media lavada. Suavemente se agregó la arena media dentro del filtro, procurando no mezclar la arena media con la grava.
- Usando un recipiente de 1 litro, se adicionaron 5 litros de agua (no-clorada) al recipiente.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa 16 lts de arena fina lavada. Suavemente se agregó la arena fina dentro del filtro, procurando no mezclar la arena fina con la arena media.

- Se colocaron los 5 kg de clavos de hierro previamente oxidados dentro de la pana y se extendieron uniformemente. Se agregaron astillas de ladrillo o piedras para cubrir la pana y distribuir uniformemente el agua.
- Se tapó el balde con la tapa.
- Esperar por un tiempo de 48 horas para desinfectar la arena fina y gruesa.
- Se vertieron 45 litros de agua en el filtro y se desechó el agua filtrada.
- Terminada esta operación el filtro se pudo operar.

Tabla 10. Arreglo del filtro KANCHAN

MATERIAL/ESPECIFICACIÓN	CANTIDAD/ CRITERIO/ CAPACIDAD	UNIDAD DE MEDIDA
Clavos de hierro de 1 pulgada.	5	kg
Arena fina de río (<1mm).	16	lts
Arena media (3 a 6mm).	4	lts
Grava (6 a 15mm).	6	lts
Balde de plástico.	45	lts
Pana de plástico.	10	lts
Trozos de ladrillos de barro (5 a 10cm).	2.5	kg.
Nivel de agua por encima de la arena.	5	cm.
Volumen de agua por encima de la arena.	5	lts
Volumen de espacio vacío entre el Nivel Estático del Agua y la pana.	3	lts

SONO filter

Construcción

- Se trazó una línea a dos pulgadas del fondo del balde superior de 30 litros y se realizó un agujero de $\Phi \frac{1}{2}$ " por debajo de la línea, usando un niple de hierro caliente donde se colocó una llave de chorro de $\Phi \frac{1}{2}$ " PVC.
- En la parte superior del balde inferior de 25 litros se hizo una perforación de $\Phi \frac{1}{2}$ ", usando el niple de hierro caliente, uniendo posteriormente el balde superior e inferior por medio de una manguera transparente flexible de $\Phi \frac{1}{2}$ " PVC.
- En el balde inferior con capacidad de 25 litros se realizaron dos perforaciones de $\Phi \frac{1}{2}$ " en extremos opuestos usando el niple de hierro caliente, posteriormente se colocaron dos llaves de chorro PVC de $\Phi \frac{1}{2}$ ".
- Usando el rayo de bicicleta caliente en el fondo de la pana de 10 lts, se realizaron dos perforaciones de 2 mm de diámetro de forma equidistante.
- Se llenó el recipiente con agua, verificando que no existiera filtración en la parte exterior de ambos baldes en la unión de las llaves.
- Al no existir filtración la construcción se completo satisfactoriamente.

Instalación

- Se construyó una superficie estable bien nivelada donde se colocó el filtro.
- Se agregaron 20 gotas de hipoclorito de sodio a un balde de 10 lts de agua.
- Se puso el agua clorada en el balde inferior de 25 litros.
- Se puso en el fondo del balde superior junto a la llave de chorro, trozos de ladrillos de tejas.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde superior 5 kg de arena media lavada. Suavemente se agregó la arena media dentro del filtro.
- Se colocó como segunda capa los 5 kg de clavos de hierro oxidados dentro del balde superior y se extendieron uniformemente, sustituyendo de esta manera la matriz de compuesto de hierro.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa de arena media de 5 kg en el balde superior. Suavemente se agregó la arena media dentro del filtro.

- Se puso en el fondo del balde inferior de 25 litros, trozos de ladrillos de tejas en los extremos del balde donde se colocaron las llaves de chorro de $\Phi \frac{1}{2}$ " PVC.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó en el fondo del balde inferior 5 kg de arena fina lavada. Suavemente se agregó la arena fina dentro del filtro.
- Se colocó como segunda capa 2 kg de carbón de leña seleccionando trozos de carbón lo mas uniforme posible.
- Usando un recipiente de 1 litro de capacidad se colocó una tercera capa de 5 kg de arena media lavada. Suavemente se agregó la arena media dentro del filtro.
- Terminada esta operación el filtro se pudo operar.

Tabla 11. Arreglo del Filtro SONO filter

MATERIAL/ESPECIFICACIÓN	CANTIDAD/ CRITERIO/ CAPACIDAD	UNIDAD DE MEDIDA
<u>BALDE SUPERIOR</u>		
Clavos de hierro de 1 pulgada.	5	kg
Arena fina de río (<1mm).	5	kg
Arena media (3 a 6mm).	5	kg
Balde de plástico.	30	lts
Trozos de ladrillos de barro (5 a 10cm).	1	kg
<u>BALDE INFERIOR</u>		
Arena fina de río (<1mm).	5	kg
Arena media (3 a 6mm).	5	kg
Balde de plástico.	25	lts
Trozos de ladrillos de barro (5 a 10cm).	1	kg
Carbón orgánico.	2	kg

3.5. Operación de los filtros.

La operación de los filtros duró aproximadamente tres meses y fueron instalados en el CIEMA – UNI para facilitar la operación y análisis de las variables de estudio

3.5.1. Fuente de agua contaminada con arsénico.

Se realizó un recorrido de campo para seleccionar la fuente de agua subterránea adecuada para llevar a cabo el estudio. Durante la visita de campo el pozo seleccionado arrojó una concentración de 73 µg/L de arsénico total, medición realizada con el equipo portátil ARSEATOR, propiedad del CIEMA - UNI.

La fuente seleccionada es subterránea, captada por medio de un pozo perforado equipado con bomba de mecate, es de uso público y se encuentra ubicado en el centro de la comunidad. De esta fuente de agua se recolectaban semanalmente aproximadamente 160 litros de agua para ser utilizada en los filtros en estudio. Ver en anexo B análisis físico químico del agua en estudio.

3.5.2. Ciclo de filtración.

Filtro KANCHAN

La filtración se dividió en tres ciclos.

En el primer ciclo se filtraron 10 litros de agua cruda diariamente por un espacio de 42 días, para un volumen total de 420 litros de agua filtrada.

En el segundo ciclo se filtraron 20 litros de agua cruda diariamente por un espacio de 17 días, para un volumen total de 340 litros de agua filtrada.

En el tercer ciclo se filtraron 30 litros de agua cruda diariamente por un espacio de 17 días para un volumen total de 510 litros de agua filtrada.

SONO filter

Un ciclo de filtración se realizó, debido a la baja eficiencia de remoción de arsénico presentada durante el ciclo de filtración de los 10 litros de agua cruda que se filtraron por un espacio de tiempo de 32 días para un volumen total de 320 litros de agua filtrada. La operación del filtro se interrumpió en el primer ciclo de filtración.

3.5.3. Variables de estudio.

Arsénico.

La medición de la concentración inicial de arsénico se realizó en el sitio de recolección de agua cruda, es decir, en el pozo seleccionado para el estudio. La concentración de arsénico en el agua tratada era medida diariamente de muestras tomadas por cada 10, 20, 30 litros de agua filtrada.

Hierro.

En este estudio el hierro es un parámetro que se evaluó en el efluente tratado para monitorear posibles alteraciones con respecto a la concentración inicial presente en el agua cruda. Además, es un indicador de la eficiencia de remoción de arsénico de los filtros, por lo tanto, si el hierro es encontrado en el agua filtrada, entonces es muy probable que también se encuentre arsénico (Ngai and Walewijk, 2003). Las mediciones de hierro se realizaron en el agua cruda y en el agua tratada.

Fosfatos

La bibliografía consultada plantea que este parámetro es importante tenerlo en cuenta, debido a que compite por el hierro con el arsénico. El fosfato puede reducir significativamente la adsorción del arsénico, porque usualmente está presente en altas concentraciones como el arsénico. (Mahim *et al.*, 2008). El análisis de fosfato se realizó al agua de pozo.

Turbiedad.

La turbiedad es otro parámetro que se evaluó en el agua filtrada para monitorear posibles alteraciones con respecto a la concentración inicial presente en el agua cruda. Algunos autores señalan que no siempre existe una correlación entre la remoción de turbiedad y la remoción de arsénico, sin embargo, para una remoción de arsénico es un prerequisite una buena remoción de turbiedad. Las mediciones de turbiedad se realizaron en el agua cruda y en el agua tratada.

Tasa de filtración.

La tasa de filtración es uno de los factores más importante de aceptabilidad social de un filtro. Las comunidades prefieren filtros con alta tasa de filtración (Shrestha, 2004). Una tasa de filtración mayor a los 30 litros por hora (L/h), puede reducir la eficiencia del filtro, al no retener en el medio filtrante partículas de arsénico y hierro. Una tasa de filtración menor a los 5 L/h, puede ser muy inoportuna para el usuario. Para determinar la tasa de filtración, se siguieron los pasos siguientes:

Se vertieron diariamente en cada uno de los filtros un volumen de agua cruda de 10 litros.

- Con un balde graduado con capacidad de 10 litros se medían diariamente los 10 litros de agua filtrada.
- El tiempo requerido para filtrar los 10 litros de agua se expresó en minutos, el equipo utilizado para medir el tiempo de filtración de los 10 litros fue un cronómetro.
- La tasa de filtración se expresó en litros por hora.
- Para el caso de los ciclos de agua de los 20 y 30 litros, a los primeros 10 litros de agua filtrada se les tomó el tiempo de filtración con un cronómetro expresándose este tiempo en minutos.

3.5.4. Parámetros de control de calidad de agua.

Los parámetros analizados para monitorear la calidad del agua filtrada fueron los siguientes:

Potencial Hidrogeno (pH).

El pH es uno de los parámetros más importantes del agua, es la medida del grado de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa y se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+]$). Muchas de las reacciones químicas dependen del pH. El arsénico no es la excepción, en el rango de pH de 4 a 10, el compuesto arsenito H_3AsO_3 predominante es neutro (no posee carga), contrario al arsenato H_2AsO_4^- que se encuentra cargado negativamente. La eficiencia de remoción del arsénico (III) es mucho menor a la del arsénico (V) debido a que este último tiene la carga negativa.

La revisión bibliográfica muestra que la mejor adsorción de arsénico (V) sobre el hidróxido de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ tiene lugar entre un pH de 4 y 7. Al aumentar el pH, la adsorción de arsénico por el coágulo de hidróxido de hierro disminuye. El pH del agua de pozo se utilizó para comprobar la especie de arsénico presente en el agua.

El pH del agua fue tomado en dos momentos, durante recolección de agua en el pozo y en el agua filtrada de ambos filtros.

Conductividad Eléctrica

La conductividad de una disolución es la medida de su capacidad para conducir la corriente eléctrica y se expresa habitualmente en microsimen por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). También, la conductividad eléctrica de agua fue tomada en dos momentos, en la recolección de agua en el pozo y en el efluente de ambos filtros. La conductividad eléctrica brinda información sobre la cantidad de las sustancias disueltas en solución.

Potencial REDOX

El potencial redox (Eh) y el pH son los parámetros más importantes que controlan la especiación del arsénico, o sea su estado de oxidación. Los potenciales redox controlan los procesos químicos naturales e indican los cambios en las propiedades del agua debido a los procesos biológicos aerobios o anaerobios. Los potenciales menores de -20 milivoltios (mv) se dan en procesos anaeróbicos, entre 0 y -200 milivoltios son transicionales y los valores positivos indican procesos aeróbicos.

El potencial redox se tomó en dos momentos: en la recolección de agua en el pozo y en el agua filtrada de ambos filtros. El potencial redox del agua de pozo se utilizó para comprobar la especie de arsénico predominante en el agua.

Temperatura.

La temperatura es otro parámetro importante de la calidad del agua. Igual que las variables anteriores, la temperatura fue tomada en dos momentos, en la recolección de agua en el pozo y en el agua filtrada de ambos filtros.

Fosfato

La bibliografía consultada plantea que este parámetro es importante tenerlo en cuenta debido a que compite por el hierro con el arsénico. El Fosfato puede reducir significativamente la adsorción del arsénico porque usualmente está presente en altas concentraciones como el arsénico (Mahin *et al*, 2008). En este estudio una medición de fosfato se realizó al agua cruda.

3.5.5. Método de análisis de laboratorio.

Se realizaron análisis de arsénico, hierro, fosfato y turbiedad para evaluar el comportamiento de los filtros. Para monitorear cambios en la calidad del agua filtrada se realizaron análisis en pH, conductividad eléctrica, potencial redox y temperatura. El procedimiento utilizado para el análisis se detalla a continuación.

a. Arsénico.

La medición de arsénico se realizó por medio del método de GENERACIÓN DE HIDRUROS CON ARSENATOR. Este procedimiento mide únicamente arsénico total, el cual es transformado en su hidruro correspondiente con boro hidruro de sodio en medio ácido, generando el gas arsina que es retenido en el filtro de sulfuro de hidrógeno.

Materiales:

- ✓ Arsenator
- ✓ Trampa triple.
- ✓ Slides rojo y negro.

- ✓ Erlenmeyer boca esmerilada, 125 ml.
- ✓ Frasco de almacenamientos de filtro para slides rojos y negros.
- ✓ Pinza para colocar los filtros en los slides.
- ✓ Bolsa de eliminación para filtros después de realizado el análisis.
- ✓ Hisopos para lavar los erlenmeyer.
- ✓ Probeta graduada de 50 ml.
- ✓ Pizeta.

Reactivos:

- ✓ Filtros de sulfuro de hidrógeno.
- ✓ Reactivo ácido sulfámico, (Tabletas A1).
- ✓ Tabletas de boro hidruro de sodio, (Tabletas A2).
- ✓ Filtro de retención de arsénico (como arsina).
- ✓ Filtro de retención de otros gases.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Jabón para lavado de la cristalería.

Procedimiento de Análisis.

- Se abre el slide color negro y se coloca un filtro del frasco con etiqueta negra, asegurándose colocar correctamente el filtro en la sección rectangular del slide. Esta precaución garantizará un buen resultado. Se prepara siempre un slide extra que servirá para calibrar el equipo.
- Se abre el slide color rojo y coloque un filtro del frasco con etiqueta roja, asegurándose colocar correctamente el filtro en la sección rectangular del slide. Esta precaución garantizará un buen resultado.
- Se inserta el filtro de sulfuro de hidrógeno en la parte inferior cilíndrica de la trampa triple.
- Se inserta el slide negro (con su respectivo filtro) en la ranura inferior de la parte rectangular de la trampa triple.

- Se inserta el slide rojo (con su respectivo filtro) en la ranura superior de la parte rectangular de la trampa triple.
- Se adiciona el reactivo A1, asegurándose que no queden residuos de este reactivo en las paredes del erlenmeyer.
- Se mide 50 ml de muestra del agua (cruda o tratada) y se adicionan en el erlenmeyer boca esmerilada.
- Se enciende el Arsenator, presionando cualquiera de las teclas con los símbolos * ó #.
- Se esperan unos segundos hasta que aparezca en pantalla **Insert Slide** y se introduce el slide negro que contiene el papel filtro calibrador.
- Se adiciona el reactivo A2 al erlenmeyer e inmediatamente se tapa el erlenmeyer con la trampa triple.
- Inmediatamente después de haber tapado el erlenmeyer se retire del Arsenator el slide negro con el papel filtro calibrador. En este momento el cronómetro del equipo empezará a marcar el tiempo de duración del análisis de 20 minutos.
- Después de transcurridos los 20 minutos del análisis se retira la trampa triple del erlenmeyer.
- Se retira el slide negro de la trampa triple y se introduce en el Arsenator. Después de unos segundos en la pantalla del equipo se mostrará la concentración de arsénico presente en la muestra.
- Se retira el slide del Arsenator y se apaga presionando al mismo tiempo las teclas *y #.
- Finalmente, se eliminan los filtros de los slides (negro y rojo) y se depositan en la bolsa plástica.

b. Hierro.

El análisis de hierro fue realizado por el Laboratorio de Físico – Química (F-Q) de CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del standard methods. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó a 4 °C en un termo con tiempo máximo de almacenaje de 28 horas.

c. Turbiedad.

La turbiedad del agua de pozo fue realizada por analistas del Laboratorio de Físico – Química del CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del standard métodos, para lo cual la muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración durante el traslado.

d. pH.

Se determinó pH por el método Potenciómetro; aplicable para la medición de pH en muestras de agua potable, agua superficial y aguas residuales domésticas e industriales en un rango de 4 a 1. El pH se tomó en el agua de pozo *in-situ* y en el agua filtrada. El procedimiento empleado es el siguiente:

Instrumento/Material.

- ✓ pH metro Orión 250.
- ✓ Beaker 250 ml.
- ✓ Papel blando.

Reactivos.

- ✓ 3 soluciones buffer : 4.00, 7.00 y 10.00
- ✓ Solución KCl 3M Saturado con cloruro de plata.
- ✓ Agua destilada en Pizeta.

Calibración del método.

- ✓ Encender el equipo.
- ✓ Preparar los frascos con solución tampón pH 7, 4 y 10.
- ✓ Presionar la tecla doble función y presionar CAL.
- ✓ Se observa en el display que el equipo solicita el tampón recomendado pH 7.
- ✓ Se coloca el frasco sumergiendo el electrodo, dentro de él y se presiona ENTER.
- ✓ En un lapso de (0:04 - 0:10) segundos reconoce el buffer.

- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y se seca con el papel tisú (Kleenex) moderadamente, teniendo en cuenta no tocar demasiado el ojo del electrodo de pH.
- ✓ Luego solicita el tampón recomendado pH 4.
- ✓ Se presiona ENTER al cabo de 0:04 segundos a 0:10 segundos reconoce el buffer.
- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y se seca con el papel tisú (Kleenex).
- ✓ Luego solicita el tampón recomendado pH 10.
- ✓ Se presiona ENTER al cabo de 0:04 segundos a 0:10 segundos reconoce el buffer.
- ✓ Una vez que el pH-metro ha leído el buffer, se construye una curva con datos de la pendiente.
- ✓ Cumplida estas condiciones manda una respuesta a la pantalla con el dato de la pendiente.
- ✓ Se enjuagan los electrodos con suficiente agua destilada y secados con el papel tisú (Kleenex).

Análisis de la muestra.

- ✓ Llenar una cantidad de 150 ml de muestra en un beaker de vidrio de 250 ml.
- ✓ Sumergir cuidadosamente los electrodos en el beaker.
- ✓ Esperar una lectura estable del equipo.

e. Conductividad Eléctrica.

El método para la medición de Conductividad Eléctrica es a través de celdas de platino y es aplicable en muestras de agua potable, agua superficial, agua subterránea y agua industrial. La conductividad eléctrica del agua de pozo fue realizada por analista del Laboratorio F-Q Aguas Naturales del CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del standard methods. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración durante el traslado.

f. Potencial Redox.

La medición del potencial redox representa la relativa intensidad de las condiciones oxidantes y reductoras de las soluciones y su valor es proporcional al valor de pH.

Equipo/Reactivos:

- ✓ Solución Standard Ozone Redox Potential (ORP).
- ✓ Agua destilada.
- ✓ pH metro Thermo ORION Modelo 250.
- ✓ Probeta de 50ml.
- ✓ Beaker 100 ml.

Procedimiento de calibración:

- ✓ El equipo se puso en la opción Eh.
- ✓ Se procedió a lavar electrodo con agua destilada.
- ✓ Se secó con kleenex y se introdujo en la solución Standard ORP.
- ✓ Se presionó doble función CAL para calibrarlo.
- ✓ Se verifica calibración entre $+ 420 \pm 3$ mV.

Análisis de la muestra:

- ✓ Se toma muestra en el beaker y se introduce el electrodo y se procede a la lectura.

g. Temperatura.

La temperatura del agua de pozo se tomó *in-situ* con un Termómetro (-50°C a 150°C) Marca FISHER. En el agua de entrada y filtrada se tomó diariamente la temperatura. El equipo de medición se insertaba directamente en la muestra y se tomaba la lectura.

h. Fosfato.

El análisis de fosfato fue realizado por analistas técnicos del laboratorio de Aguas Claras del CIEMA-UNI, siguiendo el procedimiento del Standard Methods. La muestra de agua de pozo se recolectó y se preservó bajo refrigeración a 4°C en un termo con tiempo máximo de almacenaje de 28 horas.

IV. RESULTADOS

La investigación consistió fundamentalmente en evaluar el comportamiento de dos tecnologías a nivel familiar en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g/L}$ de arsénico total. Las tecnologías escogidas fueron el filtro KANCHAN versión GEM 505 y el SONO filter MODELO SF-TWIN, PATENTE 1003935, 2002. El diseño de los filtros KANCHAN y SONO filter puestos a prueba en la investigación, se basó en la configuración original de las tecnologías escogidas.

Al SONO filter, solamente se realizó un ciclo de filtración que duro 31 días y para el filtro KANCHAN se realizaron tres ciclos de filtración que duraron 41 días para el primer ciclo y 17 días para los ciclos números dos y tres. Por tanto la eficiencia de los filtros se basó en los resultados de los ciclos.

4.1. Especiación del arsénico en el agua de pozo.

En la zona de Santa Rosa del Peñón predomina la especie pentavalente $(\text{H}_3\text{AsO}_4)^{-2}$ así como la especie $(\text{HA}_2\text{AsO}_4)^{-2}$ (Barragne-Bigot, 2004). Durante el desarrollo del estudio, se confirmó a través del uso del Diagrama pH-Eh, que efectivamente la especie $(\text{HA}_2\text{AsO}_4)^{-2}$ está presente en el pozo seleccionado, ver figura 11 Especie de Arsénico sector de Linda Vista en Santa Rosa del Peñón.

Tabla 12. pH y Potencial Redox muestra de agua cruda de pozo

Muestras	pH	Potencial Redox	
		(mV) Escala de Mercurio	(V) Escala de Plata
1	7.64	430	0.65
2	7.65	442	0.66
3	7.44	460	0.68
4	7.53	450	0.67
5	7.85	488	0.71
6	7.55	349	0.57
7	7.79	549	0.77
8	7.65	452	0.67
Promedio	7.64	452	0.67

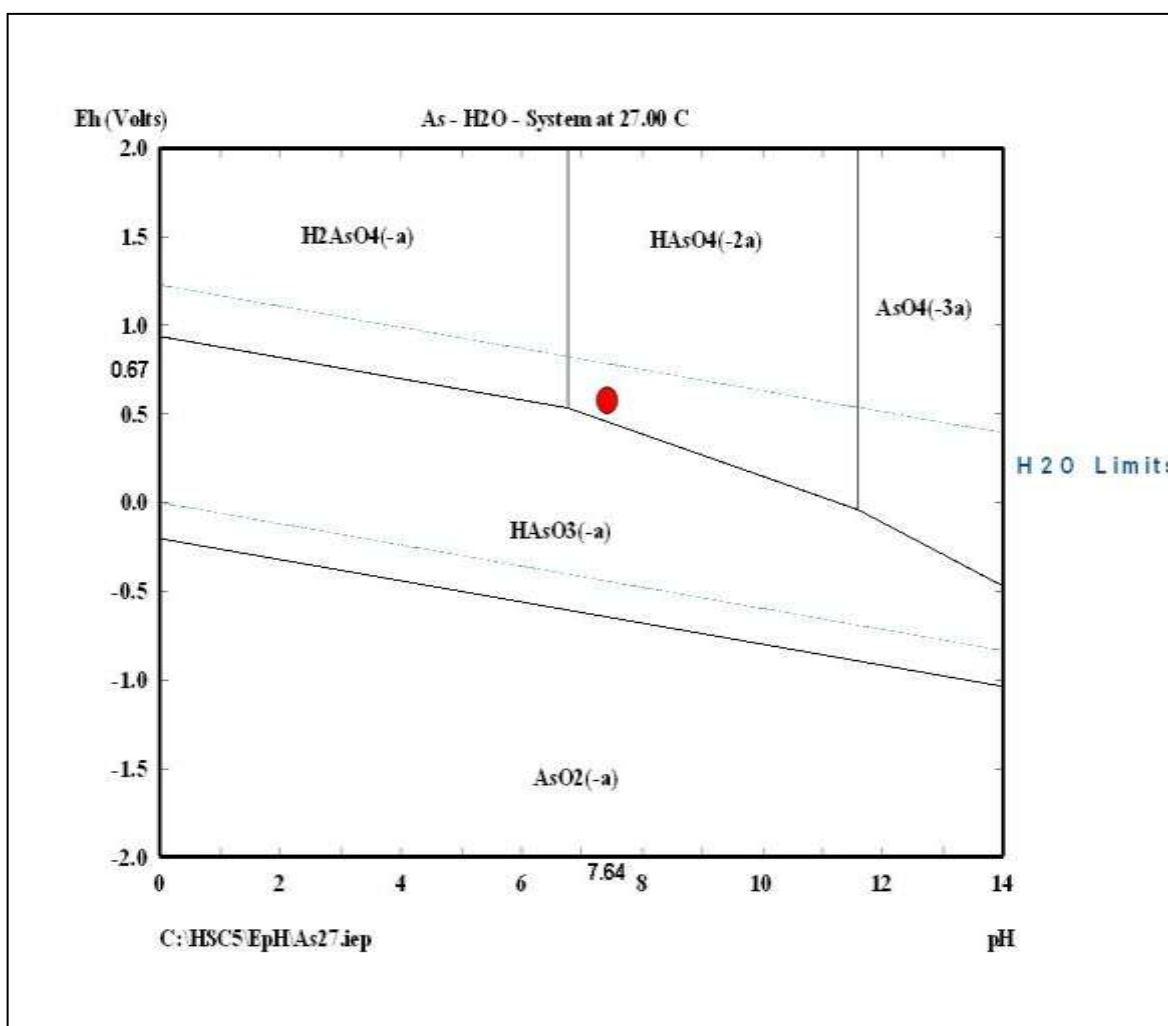


Figura 11. Especie de arsénico, pozo de Linda Vista - Santa Rosa del Peñón

El agua de pozo presentó un rango de concentración de (60 a 80) µg/L, con una media de 77 µg/ de arsénico total.

Tabla 13. Valores de arsénico total en agua de pozo.

Fuente de agua: PPBM		
Uso Público		
Comunidad: Linda Vista		
Semana de muestreo	Concentración de arsénico (µg/L)	Metodo de Análisis
06/10/2008	78	Generación de Hidruro, utilizando el equipo ARSENATOR
11/10/2008	80	
18/10/2008	80	
25/10/2008	61	
01/11/2008	77	
29/11/2008	80	
06/12/2008	79	
13/12/2008	79	
10/01/2009	80	

Nota: PPBM (Pozo Perforado y Equipado con Bomba de Mecate)

Durante las nueve semanas de muestreo la concentración de arsénico presente en el agua del pozo se encontró dentro del rango de (60 a 80) µg/L.

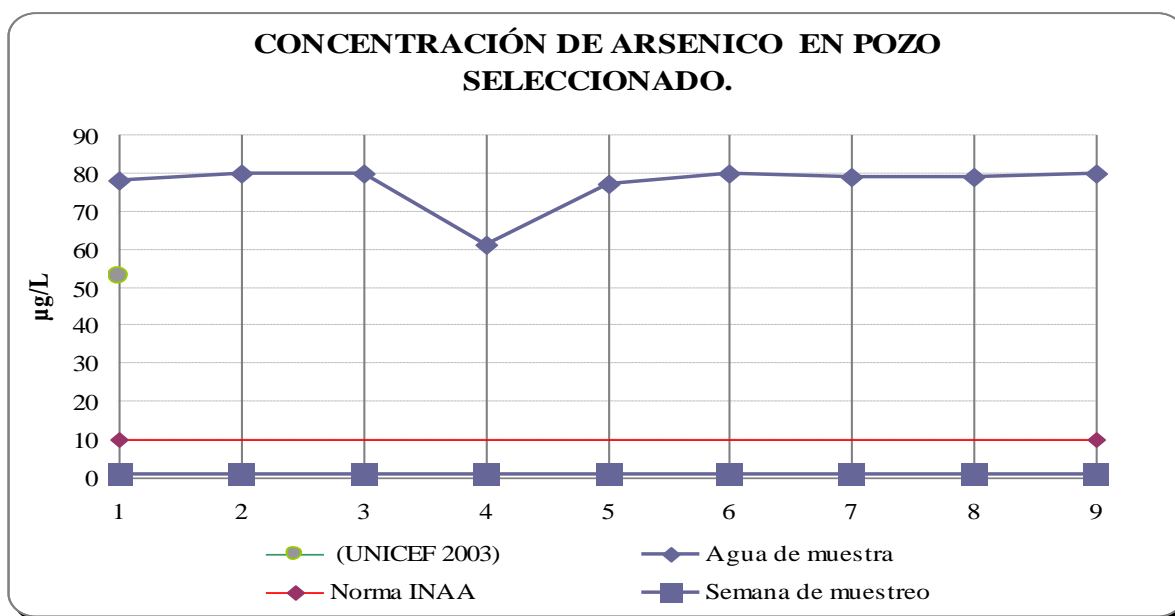


Figura 12. Comportamiento semanal de la concentración de arsénico en agua de pozo.

Tabla 14. Parámetro de agua de pozo

Semana	pH	Conductividad Eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Potencial Redox Eh mV
1	7.64	1800	30.00	430
2	7.65	1950	30.00	442
3	7.44	1890	31.00	460
4	7.53	1900	30.90	450
5	7.85	1849	30.30	488
6	7.55	1850	31.10	349
7	7.79	2050	30.6	549
8	7.65	1900	29.90	452

Tabla 15. Concentración de hierro y fosfato en agua de pozo.

Parámetro	Unidad	Valor de la Concentración	Valor Límite Permisible (Norma CAPRE)
Hierro Total	mg/L	0.143	0.30
		0.050	0.30
Fósforo Total	mg/L	0.100	NE
		0.080	NE

NE: No Especifica por la Norma

4.2. Eficiencia de los filtros en la remoción de arsénico.

La fuente de agua seleccionada es un pozo perforado equipado con bomba de mecate y de uso público, esta fuente de agua subterránea esta contaminada con altos niveles de arsénico en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g}/\text{l}$. y se encuentra ubicado en la comunidad de Linda Vista en el municipio de Santa Rosa del Peñón, del departamento de León. Las aguas de este pozo fueron las usadas en los ciclos de filtración para evaluar la eficiencia de los filtros SONO filter y KANCHAN en la remoción de arsénico.

4.2.1. SONO filter.

Primer Ciclo

a. Arsénico

El SONO filter, se probó por un período de tiempo de 31 días, el volumen de agua que se filtro bajo esta tecnología fue un total de 320 litros de agua contaminada con arsénico, se puede ver en la tabla 16 la remoción de arsénico durante este ciclo de filtración.

Tabla 16. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - SONO filter (Primer Ciclo).

Semana	Arsénico Total Agua Cruda	Arsénico Total Agua Filtrada	Norma	Remoción de Arsénico	% Remoción
1	78.0	47.3	10	30.8	39.4
2	80.0	40.2	10	39.8	49.8
3	80.0	40.6	10	39.4	49.3
4	61.0	37.2	10	23.8	39.0
5	77.0	41.8	10	35.2	45.7
6	80.0	42.8	10	37.3	46.6
7	79.0	38.0	10	41.0	51.9
Promedio	76.4	41.1	10	35.3	46.2

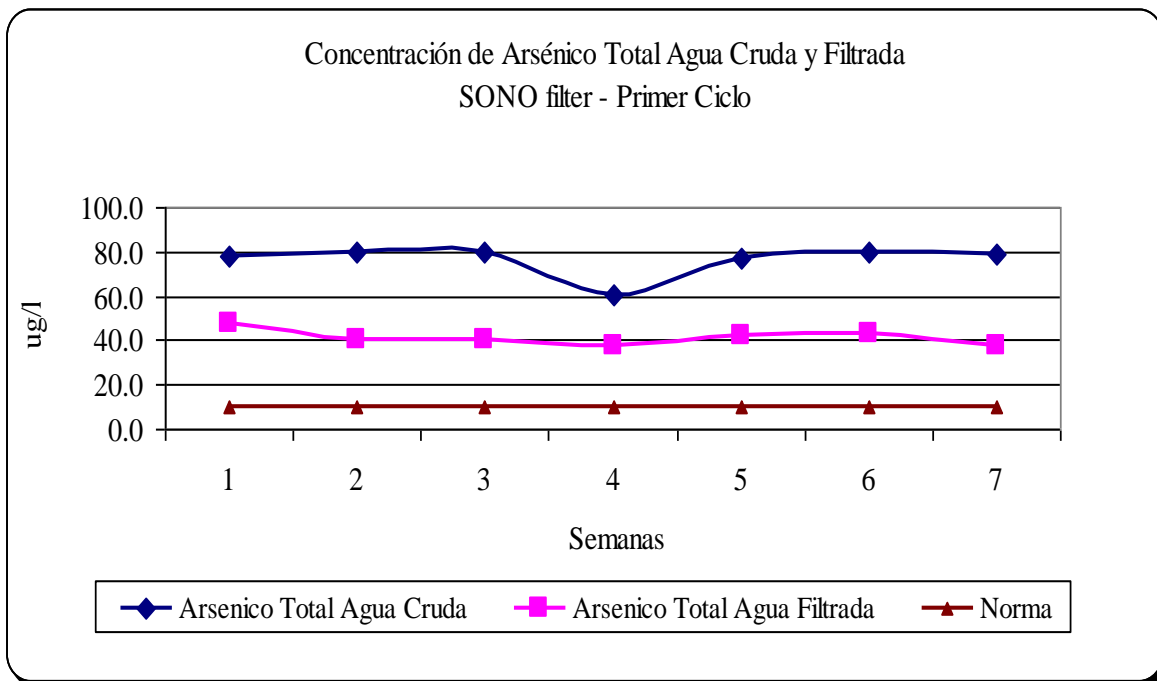


Figura 13. Concentración de arsénico total agua cruda y filtrada SONO filter (Primer Ciclo)

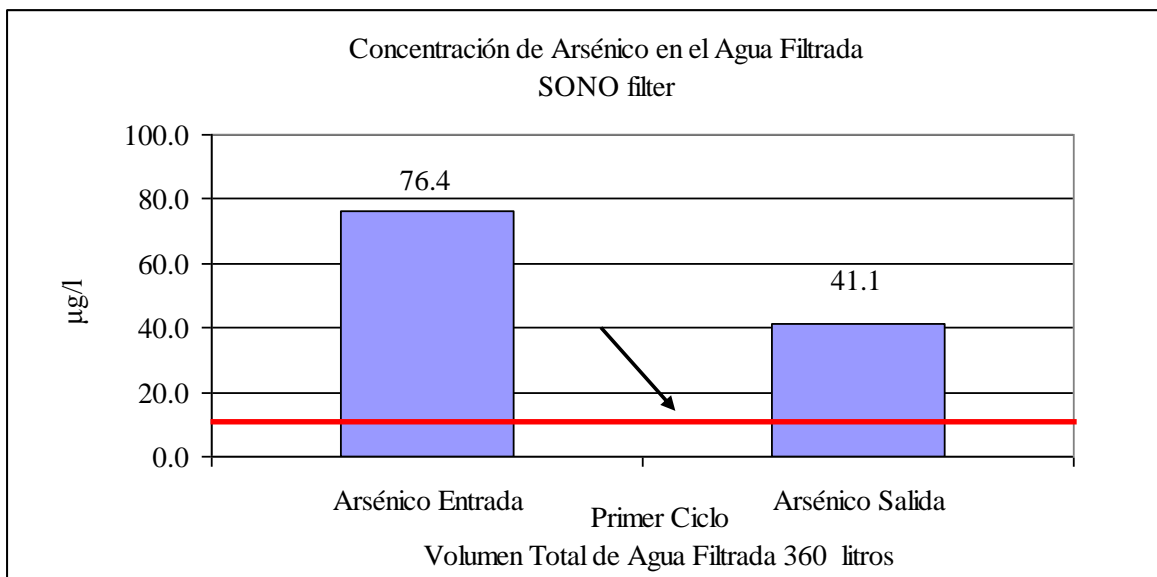


Figura 14. Concentración de arsénico agua filtrada con SONO filter (Primer Ciclo)

b. Tasa de filtración

La tasa de filtración de agua durante este ciclo también se midió diariamente y los resultados se pueden ver en la tabla 17. Tasa de filtración del filtro SONO filter.

Tabla 17. Tasa de filtración (L/h) - SONO filter (Primer Ciclo).

Semana	Volumen Filtrado (Lt)	Duración del Filtrado		Tasa de Filtración
		min	hr	L/hr
1	10	31.5	0.5	19
2	10	43.6	0.7	14
3	10	26.2	0.4	23
4	10	29.4	0.5	20
5	10	36.8	0.6	16
6	10	36.8	0.6	16
7	10	40.0	0.7	15

Nota: Los valores del volumen y duración de filtrado son promedios semanales.

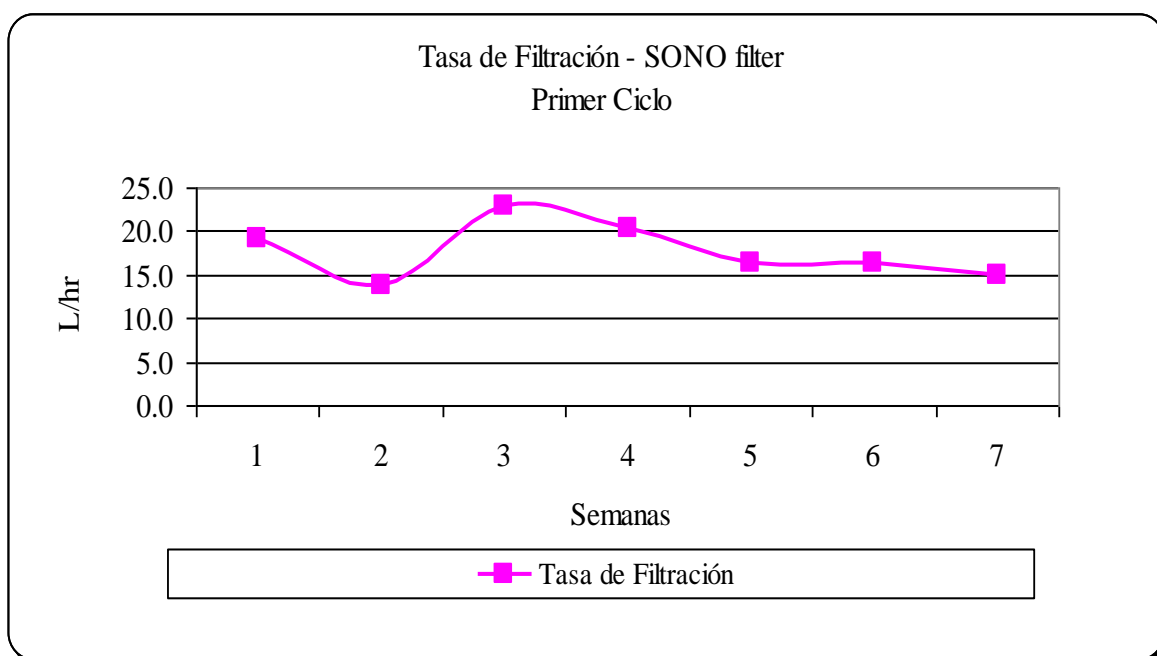


Figura 15. Tasa de filtración del SONO filter (Primer Ciclo)

c. Turbiedad

La turbiedad del agua se midió tanto en el agua cruda así como en al agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 18. Turbiedad del agua filtrada.

Tabla 18. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - SONO filter (Primer Ciclo).

No.	Turbiedad Agua Cruda	Turbiedad Agua Filtrada	Incremento
1	0.08	1.79	1.71
2	0.65	0.70	0.05
3	0.07	1.17	1.10
4	0.05	3.24	3.19
5	0.06	1.33	1.26
6	0.06	1.38	1.32
Promedio	0.16	1.60	1.44

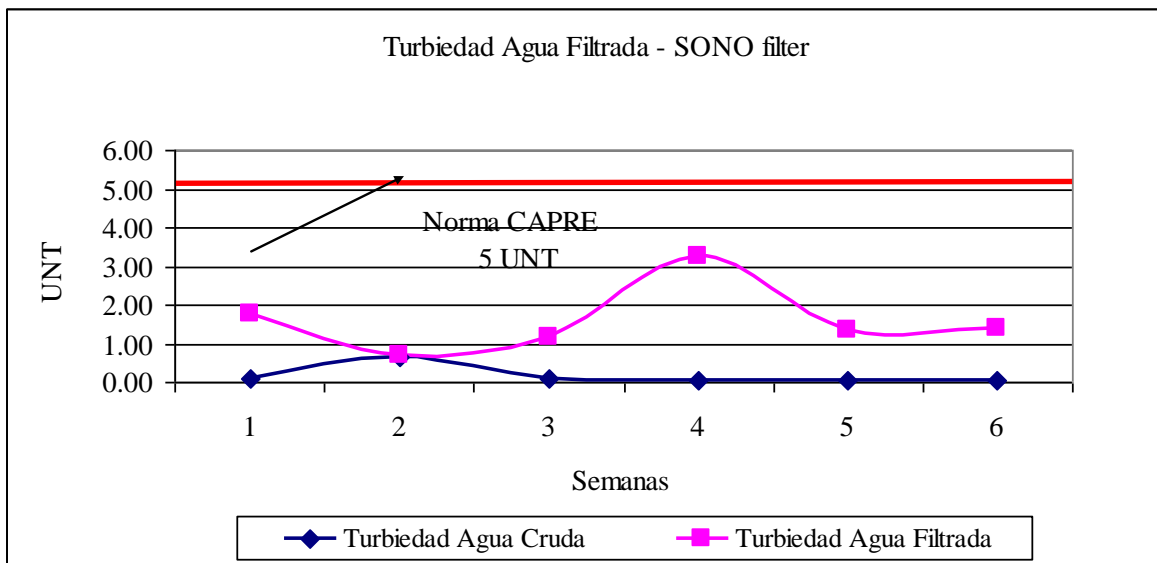


Figura 16. Turbiedad del Agua filtrada - SONO filter (Primer Ciclo)

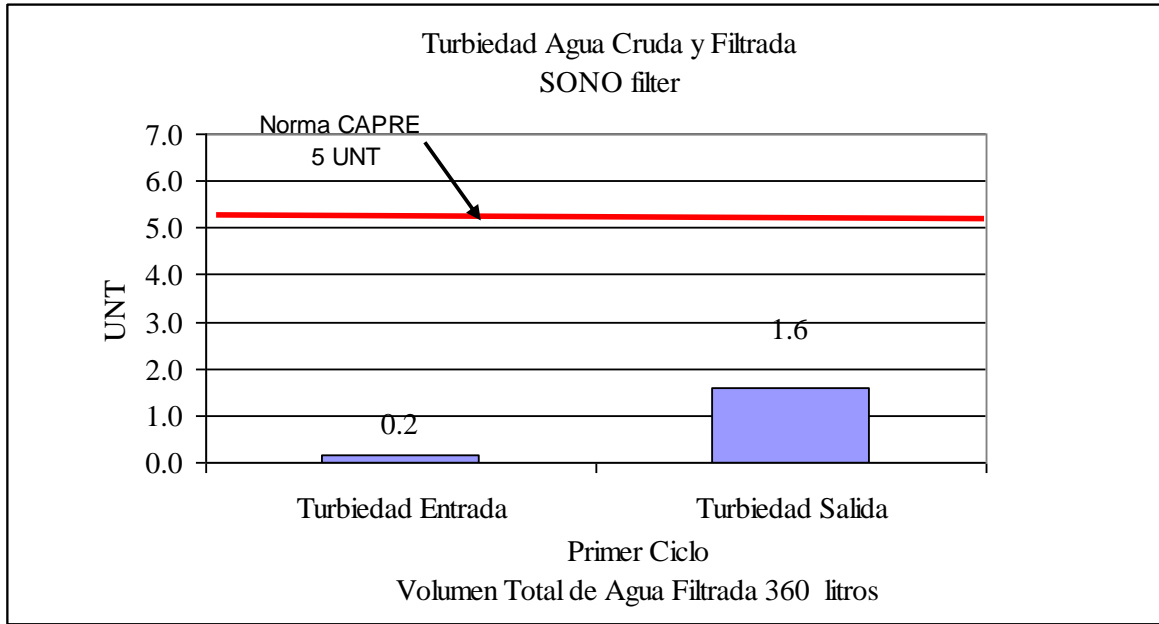


Figura 17. Promedio de Turbiedad Agua Filtrada - SONO filter (Primer Ciclo)

4.2.2. Filtro KANCHAN.

Este filtro KANCHAN, se probó por un periodo de tiempo de 75 días, el volumen total de agua que se filtró bajo esta tecnología fue de 1,270 litros de agua contaminada con arsénico, tres fueron los ciclos de filtración, en el primer ciclo se filtro un total de 420 litros de agua, en el segundo ciclo se filtró un total de 340 litros de agua y en el tercer ciclo se filtro un total de 510 litros de agua. Los resultados de estos ciclos de filtración se pueden ver en los cuadros y gráficos que se presentan a continuación.

Primer Ciclo

a. Arsénico

En el primer ciclo de filtración el volumen total de agua filtrada fue de 420 litros y duró por un espacio de tiempo de 41 días, se puede ver en la tabla 19 la remoción de arsénico durante este ciclo de filtración.

Tabla 19. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).

Semana	Arsénico Total Agua Cruda	Arsénico Total Agua Filtrada	Norma	Remoción de Arsénico	% Rem.
1	78.0	7.5	10	70.5	90.4
2	80.0	6.8	10	73.3	91.6
3	80.0	2.0	10	78.0	97.5
4	61.0	2.0	10	59.0	96.7
5	77.0	2.7	10	74.3	96.5
6	80.0	2.0	10	78.0	97.5
7	79.0	2.0	10	77.0	97.5
8	79.0	2.0	10	77.0	97.5
9	80.0	2.6	10	77.4	96.8
Promedio	77.1	3.3	10	73.8	95.8

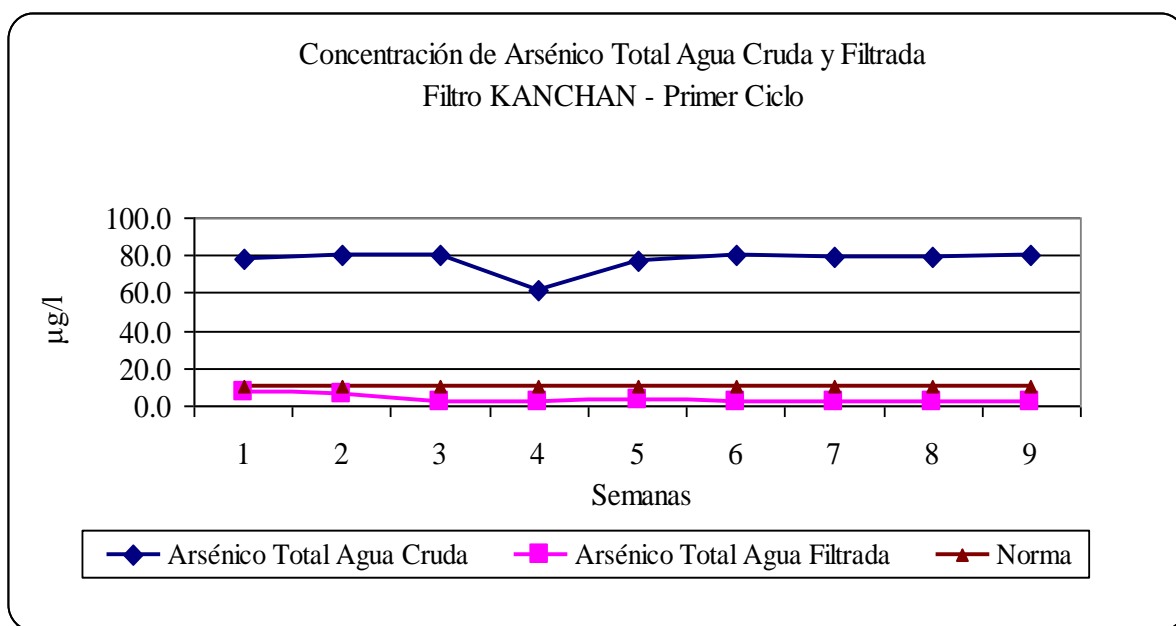


Figura 18. Concentración de arsénico total agua cruda y filtrada - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).

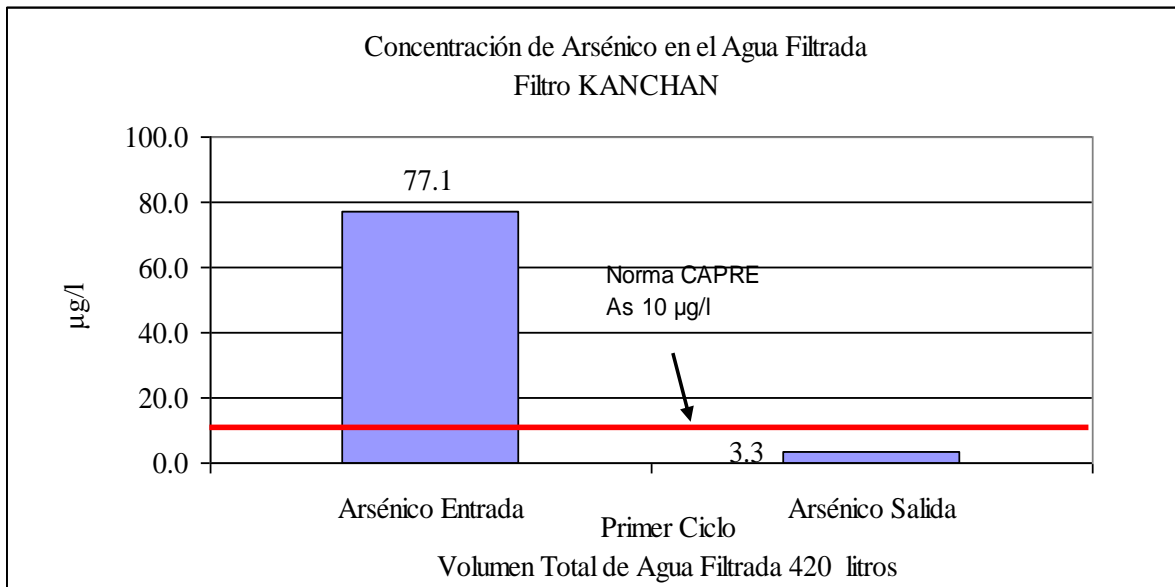


Figura 19. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)

b. Tasa de filtración

La tasa de filtración de agua durante este ciclo también se midió diariamente y los resultados se pueden ver en la tabla 20. Tasa de filtración del filtro KANCHAN.

Tabla 20. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)

Semana	Volumen Filtrado (Lt)	Duración del Filtrado		Tasa de Filtración
		min	hr	L/hr
1	10	44.8	0.7	13
2	10	47.8	0.8	13
3	10	47.4	0.8	13
4	10	44.6	0.7	13
5	10	46.8	0.8	13
6	10	54.8	0.9	11
7	10	53.5	0.9	11
8	10	53.8	0.9	11
9	10	50.2	0.8	12

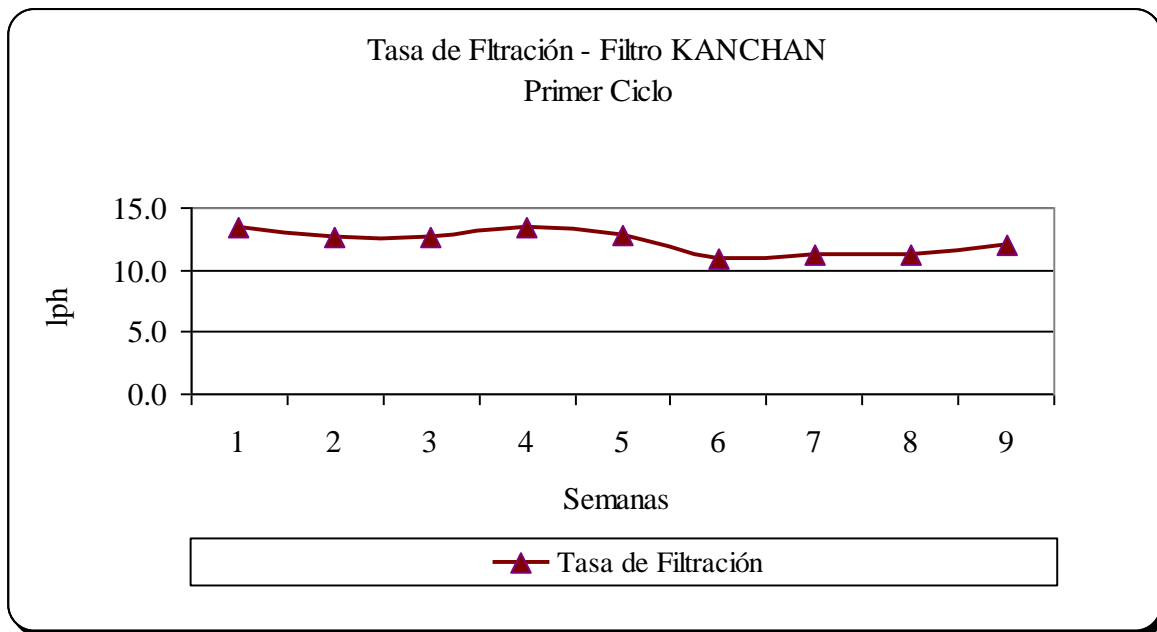


Figura 20. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Primer Ciclo)

c. Turbiedad

La turbiedad del agua se midió tanto en el agua cruda así como en al agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 21. Turbiedad del agua filtrada.

Tabla 21. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Primer Ciclo).

No.	Turbiedad Agua Cruda	Turbiedad Agua Filtrada	Remoción
1	0.62	0.08	0.54
2	0.64	0.33	0.31
3	0.42	0.07	0.35
4	0.08	0.07	0.01
5	0.08	0.07	0.01
6	0.09	0.08	0.01
7	0.06	0.05	0.01
8	0.59	0.05	0.54
Promedio	0.32	0.10	0.22

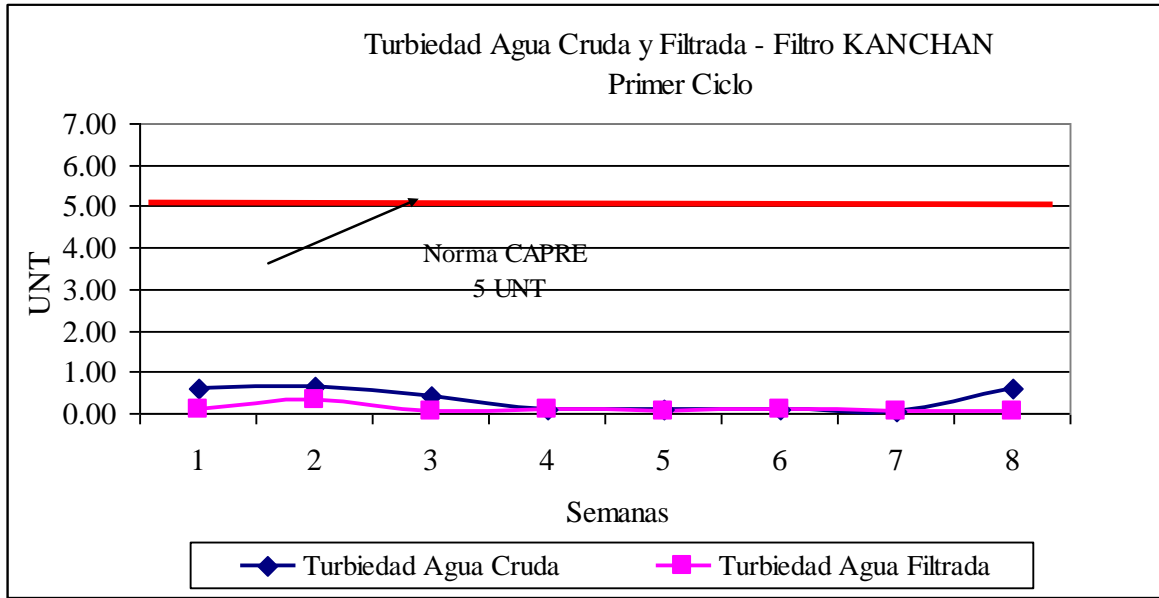


Figura 21. Turbiedad del agua filtrada – Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)

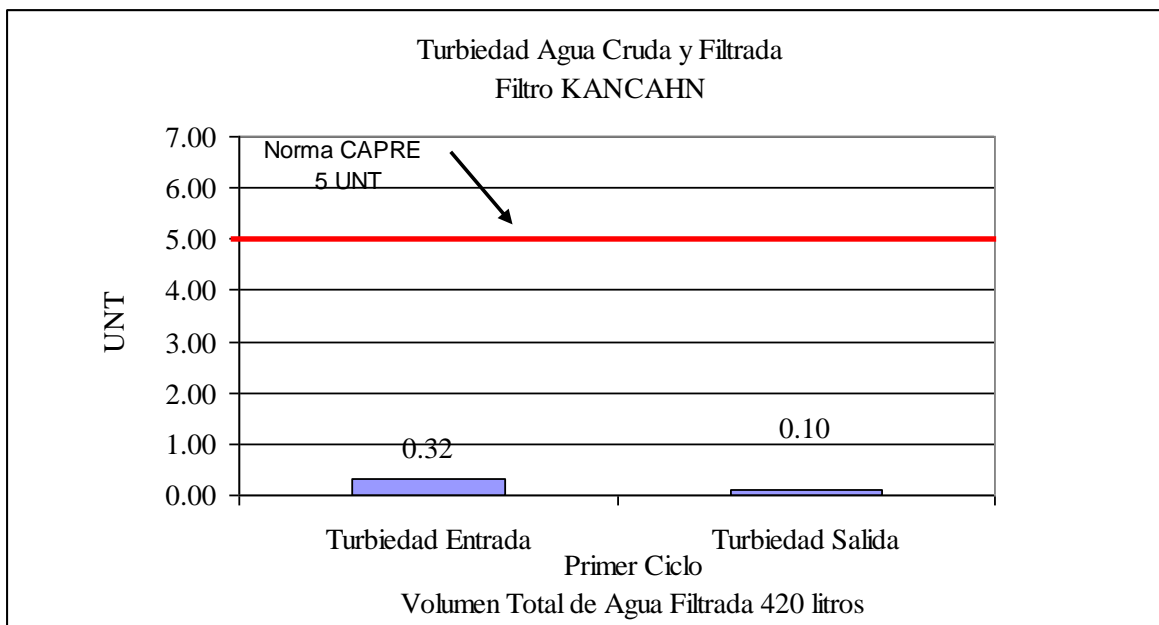


Figura 22. Promedio de turbiedad Agua filtrada – Filtro KANCHAN (Primer Ciclo)

Segundo Ciclo

a. Arsénico

En el segundo ciclo de filtración, el volumen total de agua filtrada fue de 340 litros y duro por un espacio de tiempo de 22 días, se puede ver en la tabla 18 la remoción de arsénico durante este ciclo de filtración.

Tabla 22. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).

Semana	Arsénico Total Agua Cruda	Arsénico Total Agua Filtrada	Norma	Remoción de Arsénico	% Rem.
1	80.0	2.0	10	78.0	97.5
2	79.0	2.0	10	77.0	97.5
3	79.0	2.3	10	76.8	97.2
4	80.0	2.6	10	77.4	96.8
Promedio	79.5	2.2	10	77.3	97.2

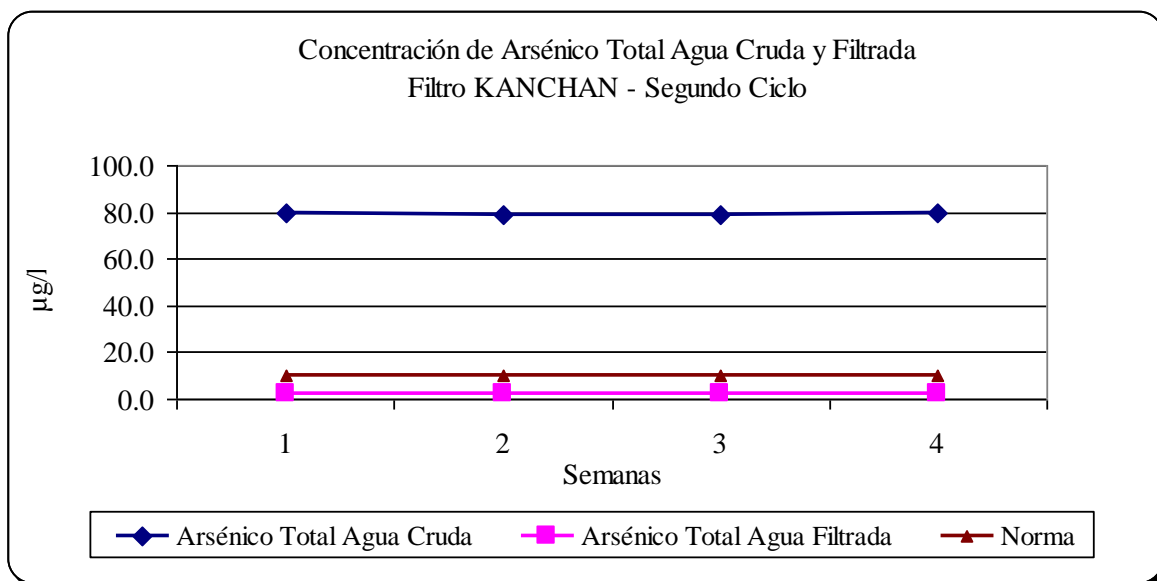


Figura 23. Concentración de arsénico agua cruda y filtrada con Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)

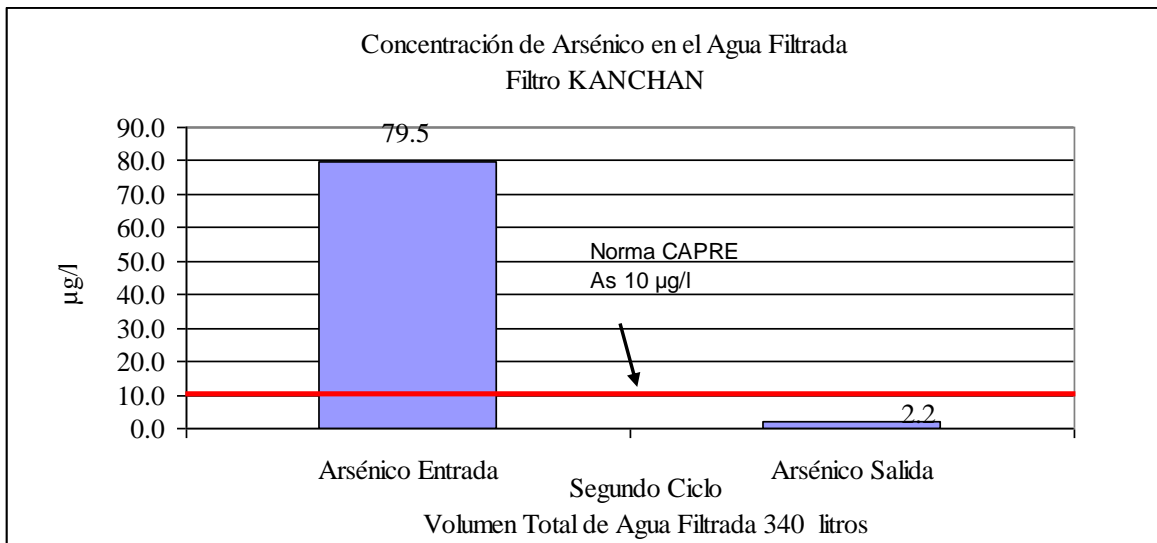


Figura 24. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)

b. Tasa de filtración

El volumen de agua filtrada durante este ciclo fue de 20 litros diarios, sin embargo la tasa de filtración se midió durante los primeros 10 litros de agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 23. Tasa de filtración del filtro KANCHAN.

Tabla 23. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).

Semana	Volumen Filtrado (Lt)	Duración del Filtrado		Tasa de Filtración
		Min	Hr	L/hr
1	10	65.40	1.09	9.2
2	10	58.20	0.97	10.3
3	10	60.00	1.00	10.0
4	10	66.00	1.10	9.1

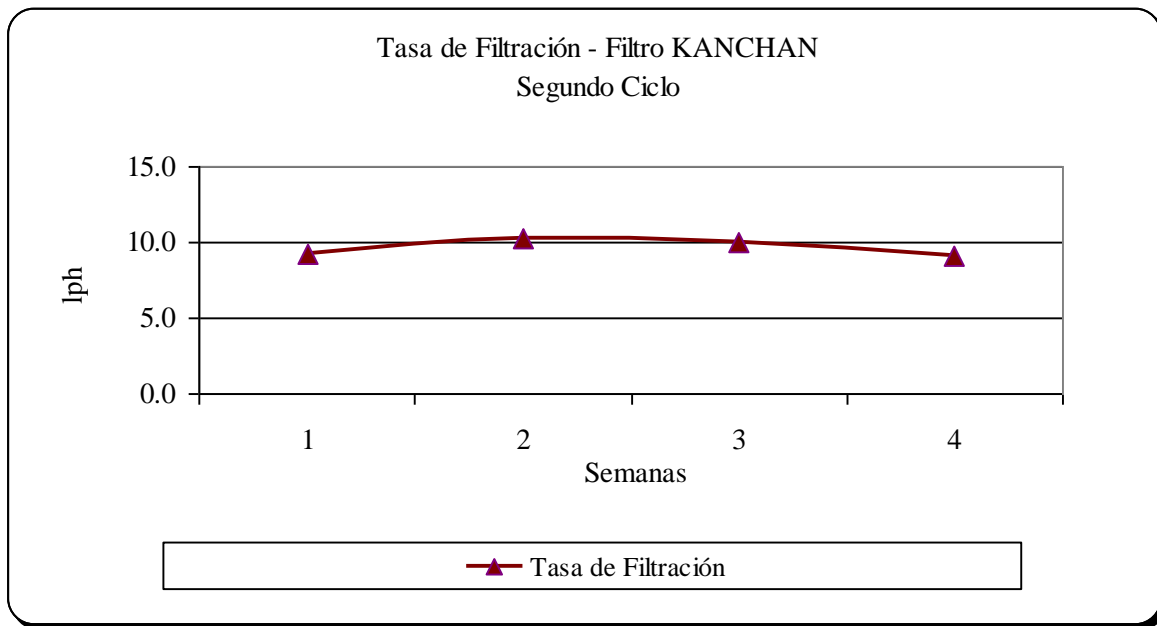


Figura 25. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)

c. Turbiedad

La turbiedad del agua se midió tanto en el agua cruda así como en el agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 24. Turbiedad del agua filtrada.

Tabla 24. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo).

No.	Turbiedad Agua Cruda	Turbiedad Agua Filtrada	Remoción
1	0.06	0.07	0.00
2	0.09	0.08	0.01
3	0.06	0.05	0.01
4	0.59	0.05	0.54
Promedio	0.20	0.06	0.14

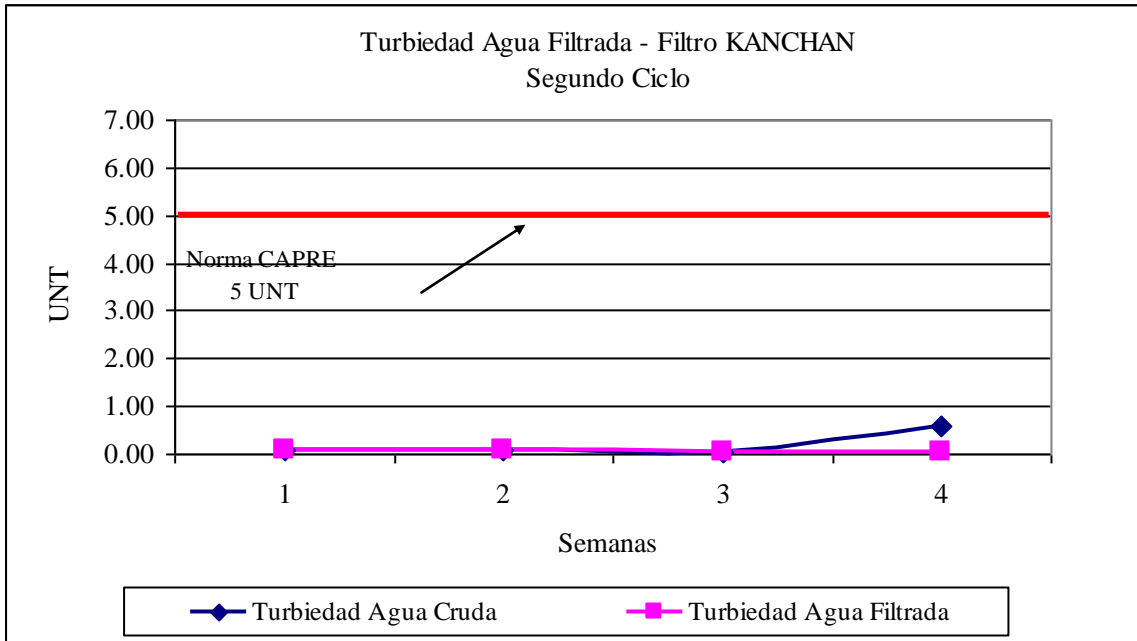


Figura 26. Turbiedad del Agua filtrada - Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)

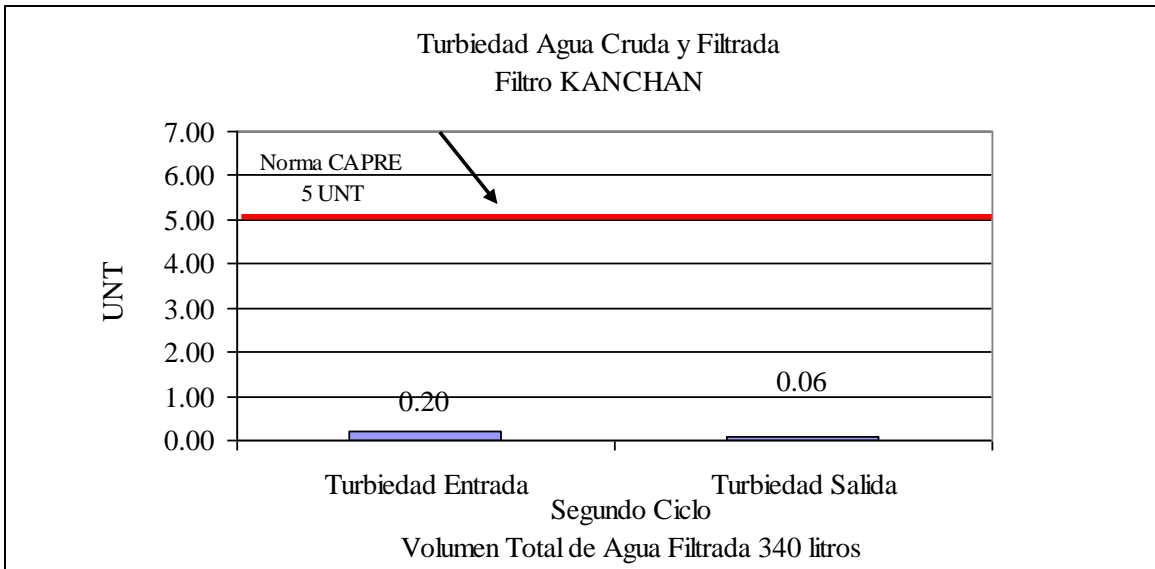


Figura 27. Promedio de turbiedad agua filtrada – Filtro KANCHAN (Segundo Ciclo)

Tercer Ciclo

a. Arsénico

En el tercer ciclo de filtración el volumen total de agua filtrada fue de 510 litros y duro por un espacio de tiempo de 17 días, se puede ver en la tabla 25 la remoción de arsénico durante este ciclo de filtración.

Tabla 25. Remoción de Arsénico Total ($\mu\text{g/L}$) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).

Semana	Arsénico Total Agua Cruda	Arsénico Total Agua Filtrada	Norma	Remoción de Arsénico	% Rem.
1	80.0	2.0	10	78.0	97.5
2	79.0	2.0	10	77.0	97.5
3	79.0	2.8	10	76.3	96.5
4	80.0	2.8	10	77.2	96.5
Promedio	79.5	2.4	10	77.1	97.0

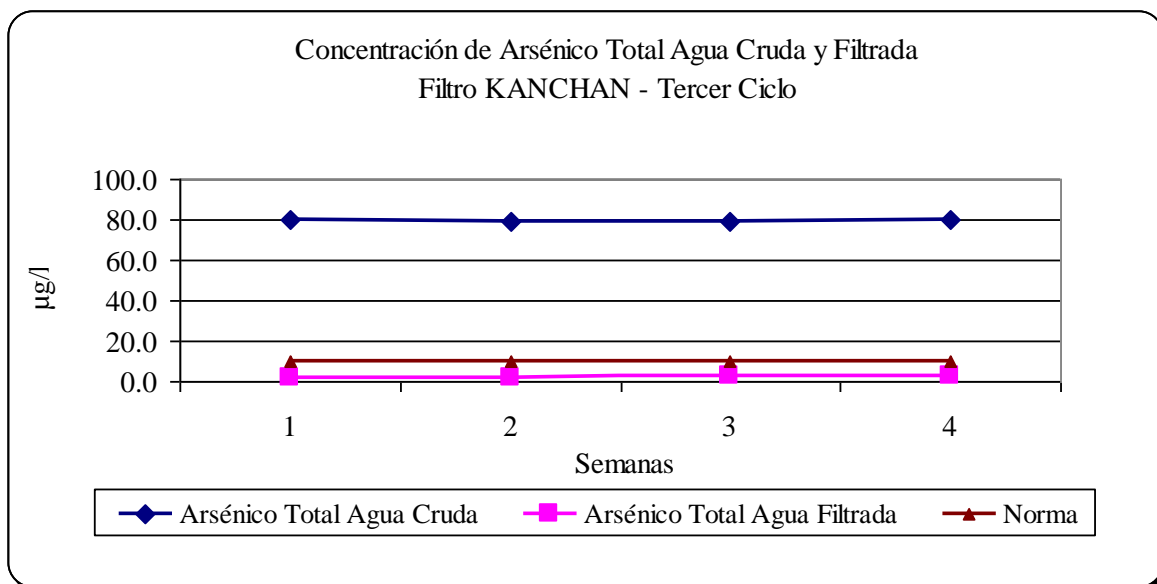


Figura 28. Concentración de arsénico agua cruda y filtrada con Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)

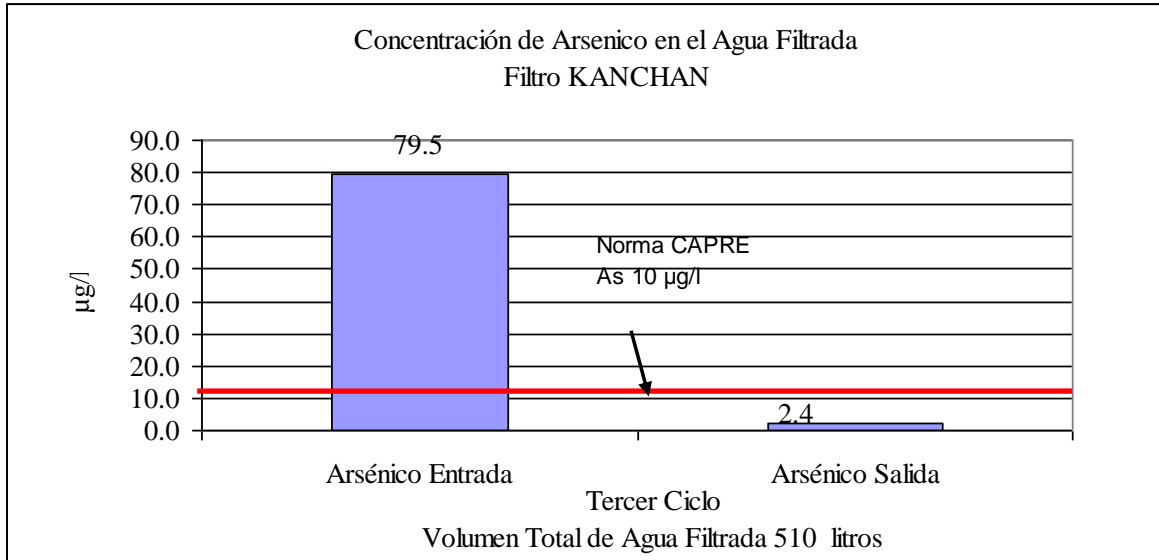


Figura 29. Concentración de arsénico agua filtrada con Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)

b. Tasa de filtración

El volumen de agua filtrada durante este ciclo fue de 30 litros diarios, sin embargo, la tasa de filtración se midió durante los primeros 10 litros de agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 26. Tasa de filtración del filtro KANCHAN.

Tabla 26. Tasa de filtración (L/h) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).

Semana	Volumen Filtrado (Lt)	Duración del Filtrado		Tasa de Filtración
		Min	Hr	L/hr
1	10	60.00	1.00	10.00
2	10	66.00	1.10	9.09
3	10	69.00	1.15	8.70
4	10	54.00	0.90	11.11

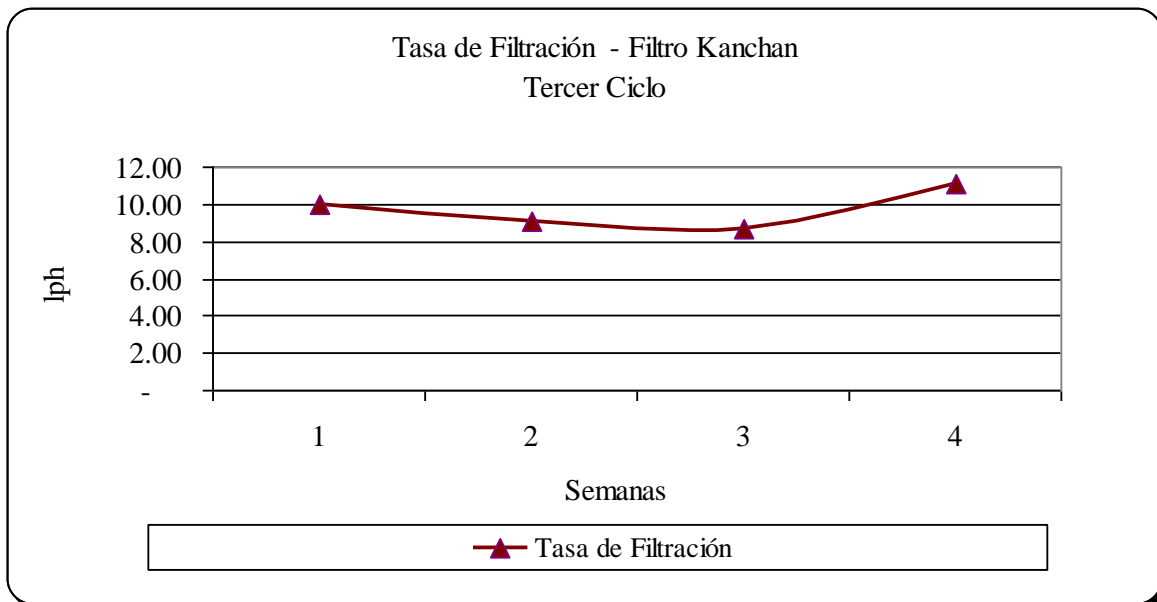


Figura 30. Tasa de filtración del filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)

c. Turbiedad

La turbiedad del agua se midió tanto en el agua cruda así como en el agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 27. Turbiedad del agua filtrada.

Tabla 27. Turbiedad del agua filtrada (UNT) - Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo).

No.	Turbiedad Agua Cruda	Turbiedad Agua Filtrada	Remoción
1	0.06	0.07	0.00
2	0.09	0.08	0.01
3	0.06	0.05	0.01
4	0.70	0.05	0.54
Promedio	0.23	0.06	0.14

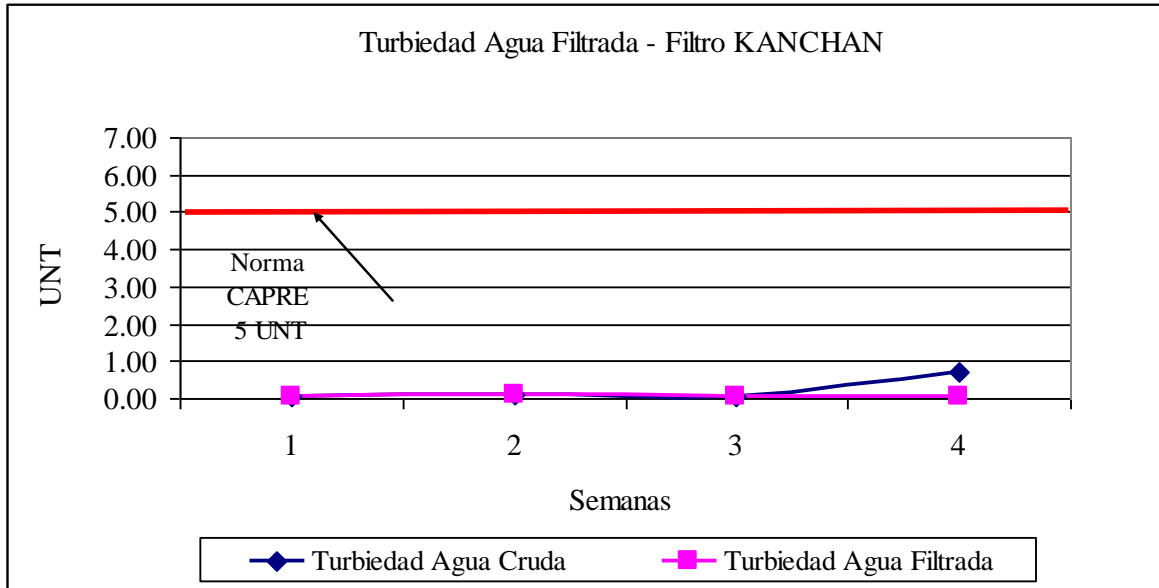


Figura 31. Turbiedad del agua filtrada – Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)

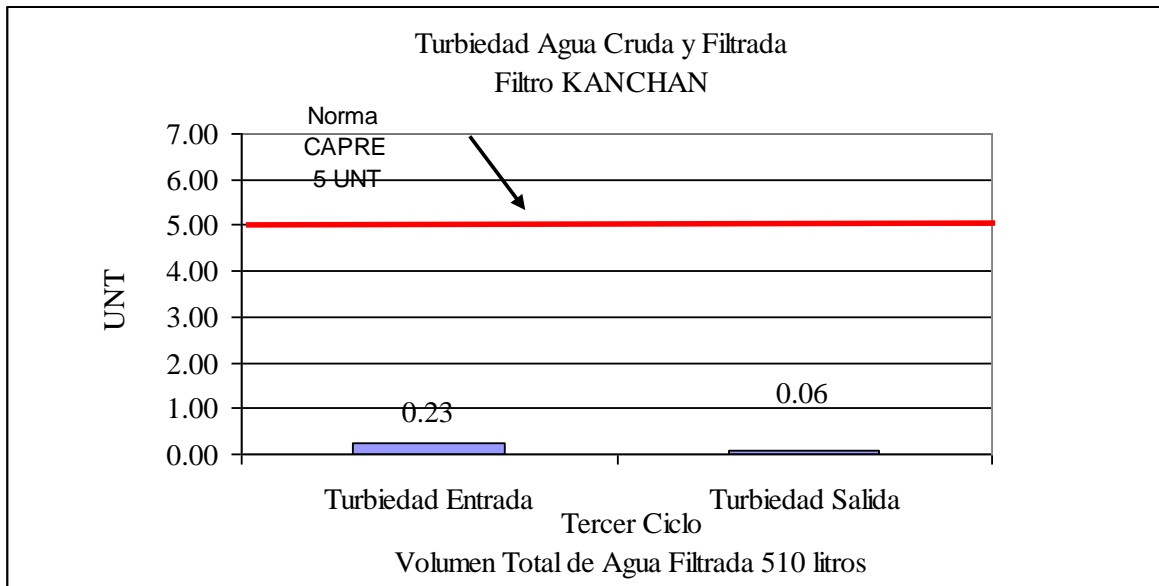


Figura 32. Promedio de turbiedad agua filtrada – Filtro KANCHAN (Tercer Ciclo)

c. Hierro Total

Se midió el Hierro Total presente en el agua cruda así como en el agua filtrada, los resultados se pueden ver en la tabla 28. Hierro Total Agua Filtrada.

Tabla 28. Concentración de Hierro Total en Agua Cruda y Filtrada - Filtro KANCHAN

Parámetro	Unidad	Concentración en Agua de Pozo	Concentración en Agua Filtrada	Valor Límite Permisible (Norma CAPRE)
Hierro Total	mg/L	0.143	0.041	0.30

d) Fósforo Total

Se realizaron dos análisis de Fósforo Total, al agua cruda, presentando valores entre los 0.10 y 0.08 mg/L, las normas CAPRE no especifica un valor límite.

4.3. Análisis e interpretación de los resultados.

Las concentraciones de arsénico total con valores de cero, determinadas con el equipo ARSEATOR, fueron consideradas con un valor de arsénico total menor a 2, dado que el equipo utilizado presenta un rango de medición entre 2 µg/L y 100 µg/L, en consecuencia la remoción de arsénico menor a 2 µg/L no pudo ser verificada.

4.3.1. SONO filter.

a. Arsénico

En el SONO filter construido la eficiencia de remoción de arsénico registró un rango de 39% - 51.9% con media de 46.2%, removiendo entre (23.8 y 41.0) µg/L con una media de 35.3 µg/L de arsénico total. Por otra parte el valor promedio de concentración de arsénico en el agua cruda fue de 76.4 µg/L y 41.1 µg/L de valor promedio en el agua filtrada.

Con estas eficiencias bajas de remoción de arsénico en el efluente durante este ciclo de filtración no se alcanzó los valor de las norma CAPRE que estipulan un valor máximo de arsénico en aguas para consumo humano de 10 µg/L.

b. Tasa de filtración

El SONO filter registró una tasa de filtración en el rango de (13.8 y 22.9) L/h con media de 17.7 L/h. Este incremento en la tasa de filtración se da porque el filtro tiene un mecanismo de control de flujo (llaves de Chorro) a mayor abertura de la llave mayor flujo de agua filtrada.

c. Turbiedad

El SONO filter presentó un incremento en la turbiedad del agua filtrada en un rango de 0.70 y 3.24 NTU con media de 1.60 NTU. La turbiedad del agua cruda durante este ciclo de filtración fue baja con un promedio de turbiedad de 0.16 UNT. Sin embargo, la turbiedad del agua filtrada presentó un ligero incremento con respecto al agua cruda pero menor valor que lo estipulado en las normas CAPRE que es de 5 UNT.

d. pH

El pH del afluente y efluente del agua en estudio es un parámetro de control. El agua cruda usada es ligeramente alcalina. El promedio de pH del agua cruda es de 7.61 y del agua filtrada es de 8.12

e. Potencial Redox (Eh)

El potencial Redox fue otro parámetro de control en este estudio. El promedio de Eh del agua cruda es de 431 mV y del agua filtrada es de 478 mV.

f. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica fue otro parámetro de control en este estudio. El promedio de conectividad del agua cruda es de 1,893 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y del agua filtrada es de 1,909 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

g. Temperatura

La temperatura del agua del efluente es menor que el agua del afluente, el promedio de temperatura del agua cruda es de 30.4° C y del agua filtrada es de 25.35° C.

Ver en anexo C, resultados experimentales del SONO filter y KANCHAN

4.3.2. Filtro KANCHAN.

a. Arsénico

En el filtro KANCHAN construido la eficiencia de remoción de arsénico en el primer ciclo registró un rango de 90.4% - 97.5% con media de 95.8%, removiendo entre (70.5 y 78.0) $\mu\text{g/L}$ con media de 73.8 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total, en el segundo ciclo registró un rango de 96.8% - 97.5% con media de 97.2%, removiendo entre (77.4 y 78.0) $\mu\text{g/L}$ con media de 77.3 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total y en el tercer ciclo registró un rango de 96.5% - 97.5% con media de 97.0%, removiendo entre (76.3 y 78.0) $\mu\text{g/L}$ con media de 77.1 $\mu\text{g/L}$ de arsénico total

Por otra parte durante el primero, segundo y tercer ciclo de filtración los valores promedios de concentración de arsénico en el agua cruda fueron de (77.1, 79.5 y 79.5) $\mu\text{g/L}$ y (3.3, 2.2 y 2.4) $\mu\text{g/L}$ de valores promedios en el agua filtrada. En todos estos ciclos de filtración la concentración de arsénico en el agua filtrada fue menor que lo establecido en las normas CAPRE para aguas de consumo humano que establece un valor máximo de 10 $\mu\text{g/L}$.

b. Tasa de Filtración

La tasa de filtración del Filtro KANCHAN en el primer ciclo de filtración registró un rango de (10.9 – 13.5) L/h con media de 12.2 L/h, durante el segundo ciclo el rango de filtración fue de (9.1 – 10.3) L/h con media de 9.6 L/h y en el tercer ciclo el rango fue de (8.7 – 11.1) L/h con media de 9.7 L/h.

c. Turbiedad

En el primer ciclo del filtro KANCHAN la turbiedad del agua filtrada estuvo en el rango de (0.05 – 0.33) UNT con media de 0.10 UNT, en el segundo y tercer ciclo el rango fue de (0.05 – 0.06) UNT con media de 0.06 UNT. La turbiedad del agua de pozo es de 0.04 UNT. Todos los valores de agua cruda y filtrada fueron menores que el valor estipulado en las normas CAPRE que es de 5 UNT.

d. Hierro

Con la finalidad de probar la eficacia de remoción de hierro con el filtro KANCHAN a este parámetro solamente se le hizo una prueba de control al agua filtrada. Se realizaron dos análisis de hierro total al agua cruda y presentaron valores de 0.143 y 0.050 mg/L, mientras que en el agua filtrada el valor de hierro fue de 0.041 mg/L. Esto es muy importante ya que el filtro remueve hierro, si el valor de hierro del agua filtrada fuese sido mayor al agua cruda entonces habría una mayor concentración de arsénico. Por otra parte se cumple con las normas CAPRE que estipula un rango máximo valor de hierro presente en el agua de consumo humano de 0.3 mg/L y el valor encontrado en el agua filtrada es mucho menor. Ver en anexo D, análisis de hierro total agua filtrada – Filtro KANCHAN.

e. Fosfatos

La concentración de fosfatos en el agua cruda, presentó valores por el orden de (0.10 y 0.08) mg/L. De acuerdo a estos resultados se puede concluir que con estos niveles de fosfatos en el agua cruda no interfiere en la remoción de arsénico. Sin embargo, pruebas de campo en Bangladesh de 5 tecnologías para remover arsénico revelaron que todas presentaron pobre desempeño en área con elevado pH (7.5-8) y niveles de fosfato PO_4 alrededor de 10 mg/L. Ver en anexo B, análisis físico químico del agua en estudio.

f. pH

El pH del afluente y efluente del agua en estudio es un parámetro de control. El agua cruda usada es ligeramente alcalina. El promedio de pH del afluente en los tres ciclos fueron de 7.64, 7.71 y 7.71 y del efluente fueron de 7.83, 7.80 y 7.80 respectivamente

g. Potencial Redox (Eh)

El potencial Redox fue otro parámetro de control en este estudio. El promedio de Eh del afluente en los tres ciclos fueron de (452, 459 y 459) mV y del efluente fueron de (455, 465 y 465) mV respectivamente.

h. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica fue otro parámetro de control en este estudio. El promedio de conductividad del afluente en los tres ciclos fueron de (1899, 1912 y 1912) $\mu\text{S}/\text{cm}$ y del efluente fueron de (1977, 1984 y 1984) $\mu\text{S}/\text{cm}$.

i. Temperatura

La temperatura del agua del efluente es menor que el agua del afluente, el promedio de temperatura del afluente en los tres ciclos fueron de 30.5°C y del efluente fueron de (24.6, 23.6 y 23.6°C).

Ver en anexo C, resultados experimentales del SONO filter y KANCHAN.

4.4. Limitaciones del estudio.

Las limitaciones del estudio fueron las siguientes:

- Los filtros se evaluaron a nivel de laboratorio y no en el sitio por problemas de traslados de los equipos de medición.
- El tiempo de 4 meses de evaluación fue muy corto, esto no permitió ver el comportamiento de colmatación de los filtros.
- No se logró determinar las variaciones de calidad del agua cruda en las épocas de verano e invierno debido a qué fue muy corto el tiempo de evaluación de los filtros tres meses.
- Las mediciones de arsénico en el agua filtrada, no se pudieron comprobar con otro método de análisis, como es la técnica de horno grafito de espectrometría de Absorción Atómica (AAS), por estar en mal estado el equipo que dispone el CIEMA – UNI durante la fase de experimento del estudio.
- La remoción de arsénico total en concentraciones más bajas que el rango de lectura del ARSENATOR ($2\mu\text{g}/\text{L}$ a $100\mu\text{g}/\text{l}$) no se pudieron determinar en el caso del filtro

KANCHAN al registrarse “0” en la pantalla del equipo, lo cual no significa que el arsénico no esté presente en concentraciones menores a $2\mu\text{g/L}$.

- Todos los análisis de agua filtrada de los filtros KANCHAN y SONO filter se realizaron con un equipo portátil llamado ARSENATOR.
- No se contó con la matriz de compuesto férrico que contiene el SONO filter, por lo que no se logró evaluar satisfactoriamente el comportamiento de dicho filtro.
- Muy pocos análisis de hierro total realizadas al agua filtrada, así como de análisis de fosfatos al agua cruda debido a limitaciones económicas.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

Las eficacias de los filtros SONO filter y KANCHAN fueron estudiados principalmente en la remoción de arsénico, turbiedad y tasa de filtración a nivel de laboratorio. A la luz de los resultados obtenidos, las conclusiones siguientes son las encontradas:

1. Los filtros KANCHAN y SONO filter fueron evaluados con Arsénico V en la especie $(\text{HAsO}_4)^{-2}$ que predominó en el agua de acuerdo a los resultados de la especiación del arsénico realizada en la zona de Santa Rosa del Peñón, ésta especie es característico de aguas subterráneas en condiciones aeróbicas.
2. El SONO filtro presentó valores muy pobres de remoción de arsénico en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g/L}$, el valor promedio de concentración de arsénico encontrado en el agua filtrada fue de 41.1 $\mu\text{g/L}$, el valor de arsénico en el agua cruda fue de 76.4 $\mu\text{g/L}$ para una remoción de arsénico total de 35.3 $\mu\text{g/L}$ lo que equivale a un 42.6% de remoción, por lo que no se logra la reducción del arsénico en agua a niveles permisibles para agua de consumo humano.
3. En cuanto a la turbiedad del agua filtrada con el SONO filter, en promedio fue de 1.6 UNT, teniendo un ligero incremento con respecto al agua cruda 0.16 UNT, sin embargo, el valor de turbiedad del efluente es menor que lo estipulado en las normas CAPRE que es de 5 UNT.
4. La tasa de filtración del SONO filter, es satisfactoria con un promedio de 17.7 L/h, esta tasa de filtración es suficiente para una familia de 6 personas, si tomamos en cuenta que para suplir sus necesidades básicas de consumo de una persona es de 7.5 Lppd y si el filtro es operado por 12 horas se tendrá un volumen de agua filtrada de 212.4 litros/día lo suficiente para abastecer a unas 28 personas/día.

5. El filtro KANCHAN, presentó valores muy altos de remoción de arsénico en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g/L}$, los valores promedios de concentración arsénico total, encontrado en el agua cruda durante los tres ciclos de filtración fueron de (77.1, 79.5 y 79.5) $\mu\text{g/L}$ mientras que las concentraciones de arsénico total en el agua filtrada fueron de (3.3, 2.2 y 2.4) $\mu\text{g/L}$ o sea que la remoción de arsénico fueron de (73.8, 73.3 y 77.1) $\mu\text{g/L}$ equivalente a (95.8, 97.2 y 97) % de remoción de arsénico. Con estas eficiencias altas de remoción de arsénico en el agua filtrada durante estos ciclos de filtración se cumple con las norma CAPRE que estipulan un valor máximo de arsénico en aguas para consumo humano de 10 $\mu\text{g/L}$.

6. La correcta selección de la arena de río con diámetro menor de 1mm es de mucha importancia porque garantiza que el complejo hierro-arsénico sea interceptado en la superficie del lecho filtrante. El arsénico adsorbido por las partículas de hierro es atrapado en la superficie de la arena sin penetrar en las profundidades inferiores, (Ghimire, 2005). Las características de la arena de río seleccionada fueron: Porosidad 40.4%, Coeficiente de uniformidad 2.22, Coeficiente de curvatura 1.54 y Permeabilidad 4.23E-02cm/s.

7. El filtro KANCHAN es capaz también de remover hierro total, se practicaron dos análisis de hierro total al agua cruda, presentando valores de 0.143 y 0.050 mg/L, mientras que en el agua filtrada el valor de hierro determinado fue de 0.041 mg/L, valor muy por debajo del agua cruda lo cual indica que el filtro remueve hierro total. Además se cumple con las normas CAPRE que estipula un rango máximo valor de hierro presente en el agua de consumo humano de 0.3 mg/L.

8. En cuanto a la turbiedad del agua filtrada con el filtro KANCHAN, en promedio durante los tres ciclos de filtración fue de (0.1, 0.06 y 0.06) UNT, cumpliendo con las normas CAPRE que estipula un valor máximo de 5 UNT para aguas de consumo humano.

9. Se practicaron dos análisis de fosfatos al agua cruda, presentando valores por el orden de 0.08 mg/L y 0.10 mg/L. De acuerdo a estos valores, se puede concluir que con estos niveles de fosfatos presentes en el agua cruda, no interfiere en la remoción de arsénico. Los fosfatos compiten con el arsénico por el hierro, en pruebas de campo

realizadas en Bangladesh a cinco tecnologías para remover arsénico revelaron que todas presentaron pobre desempeño en área con niveles de fosfato PO_4 alrededor de 10 mg/L, (BCSIR, 2003).

10. La tasa de filtración del filtro KANCHAN, es satisfactoria con un rango en promedio de (9 a 11) L/h, esta tasa de filtración es suficiente para una familia de 6 personas, si tomamos en cuenta que para suplir sus necesidades básicas de consumo de una persona es de 7.5 Lppd. Si el filtro es operado por 12 horas a razón de 9 L/h se tendrá un volumen de agua filtrada de 108 litros lo suficiente para abastecer a unas 14 personas.

12. De las dos tecnologías evaluadas el filtro KANCHAN es más eficaz en la remoción de arsénico con concentraciones en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g/L}$.

13. El filtro KANCHAN es de fácil manejo y más barato que el SONO filter modificado.

5.2. Recomendaciones.

1. Puesto que el filtro KANCHAN es eficaz en la remoción de arsénico, esta puede adaptarse como una tecnología de uso familiar, para solucionar el problema de arsénico en el agua de consumo de la comunidad de Linda Vista ubicada en el municipio de Santa Rosa del Peñón donde las concentraciones de arsénico oscilan en el rango de (60 a 80) $\mu\text{g/L}$.

2. Realizar un estudio a largo plazo al filtro KANCHAN, sobre la remoción de patógenos y otros microorganismos presentes en el agua por medio de análisis bacteriológicos, ya que esta variable no fue determinada en este trabajo, pero puede ser objeto de continuidad de estudio por alumnos del Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (CIEMA-UNI).

3. Realizar un estudio con el filtro KANCHAN sobre cual de las arenas es la más idónea y que de acuerdo a sus características físicas presente mejor remoción de arsénico, las arenas a evaluar pueden ser las del Cerro Motastepe, cauce y río. El estudio puede ser

desarrollado por alumnos del Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (CIEMA-UNI).

4. Realizar un estudio sobre el porcentaje de utilidad del banco de materiales en estado original, para determinar la cantidad de arena utilizable para la construcción de los filtros.

5. Se recomienda que para los estudios que se realicen a futuro del filtro KANCHAN, hacer mas ensayos de análisis de hierro total en el agua filtrada así como de fosfatos en el agua cruda ya que estos compiten con el arsénico por el hierro reduciendo la eficiencia de los filtros, estos análisis de control pueden ser llevados a cabo por estudiantes del Centro de Investigación y Estudios en Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (CIEMA-UNI).

6. Realizar estudios más a profundidad sobre la aceptación social del filtro KANCHAN en el medio rural a través de la implementación de un proyecto piloto que puede ser evaluado por un espacio de tiempo de 1 año, que permita conocer su grado de colmatación y de esta forma darle mantenimiento, esto lo puede implementar el CIEMA – UNI con estudiantes de pregrado.

7. De implementarse esta tecnología de filtro KANCHAN en el medio rural para solucionar la problemática de contaminación de arsénico en el agua, se sugiere que antes de ser consumida el agua por los usuarios finales, a esta agua filtrada, se le debe de dar tratamiento por medio de cloración.

8. Se recomienda que para tener buenos resultados del filtro, los usuarios deben tener la suficiente información sobre la operación y mantenimiento. Esta capacitación debe ser brindada por el CIEMA u otros organismos que trabajen para el sector de agua y saneamiento y que deseen implementar el filtro, como una solución a la problemática ambiental ya que el agua como un bien ambiental debe estar libre de contaminantes y esta tecnología KANCHAN es capaz de remover el arsénico del agua.

9. La información sobre la utilidad del filtro KANCHAN en la remoción de arsénico, puede ser diseminada en las comunidades rurales por diferentes medios, por ejemplo, periódicos, folletos, radio, televisión etc.

VI. BIBLIOGRAFIA.

- 1 Análisis de Arsénico en Aguas de Consumo y su Remoción. Disponible en <http://www.ingenieroambiental.com.ar>, Junio 2008.
- 2 Astolfi, Hidroarsenicismo crónico Regional Endémico. Tall. Gráficos Coop. Gral. Belgrano, Bs.As. 1982
- 3 Barragne-Bigot, Contribución al estudio de cinco zonas contaminadas naturalmente con Arsénico en Nicaragua. UNICEF, 2004
- 4 Castro-Larios, T. Procedimientos normalizados de operación para la determinación de arsénico total por generación de hidruros con Arsenator. Laboratorios ambientales, CIEMA-UNI. 2009
- 5 CAWST (*Centre for Affordable, Water and Sanitation Technology*). Sumario de las pruebas de laboratorio y de campo para el filtro BIOSAND. 2008
- 6 CEPIS. Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua. Serie Técnica, 1981
- 7 Chea S, Mao S, Uy D, Ngai T and Mahin T. KANCHAN Arsenic Filter: Evaluation of Aplicability to Cambodia. Phase I Technical Report, September. 2008
- 8 Ghmire B. KANCHANTM ARSENIC FILTER: Can Iron and Arsenic Particles Migrate through the Sand Layer?. Massachusetts of Tecnology and Environment and Public Health Organization. 2005
- 9 Hussam A and Munir AK. Un simple y efectivo filtro para remover arsénico basado en una matriz de compuesto de férrico: Desarrollado y validado en aguas subterráneas de Bangladesh. *Journal of Environmental Science and Health Part A* **42**, 1869–1878. 2007
- 10 Jain C.K. and Ali I. Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques. Water Research. 2000

- 11 Kosmos W. The evaluation of the arsenator. Department of Analytical Chemistry, Graz University, Austria. Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>, Julio 2009.
- 12 Lillo J. Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Madrid), España. 2002
- 13 Mahin T. Chea S, Mao S, U y D and Ngai T KANCHAN Arsenic Filter: Evaluation of Aplicability to Cambodia. Phase I Technical Report. 2008
- 14 Mohan and Pittman C.U. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents—A critical review. Department of Chemistry, Mississippi State University, Mississippi State, MS 39762, USA. Environmental Chemistry Division, Industrial Toxicology Research Centre, Post Box No. 80, Mahatma Gandhi Marg, Lucknow 226001, India. 2007
- 15 Myanmar PS, (2003). Field Evaluation of the Wagtech Arsenator. Royal School of Mines, Imperial College, London,UK. 2003 Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>, Julio 2009
- 16 Mortimer Ch. E. QUIMICA, Capitulo XVIII, página 490. Grupo Editorial Iberoamérica. 1990.
- 17 Naomi O. Performance Evaluation of the Arsenic Biosand Filter for Mitigation of Arsenic Contamination. US Peace Corps volunteer - Parasi, Nepal. Disponible en http://web.mit.edu/watsan/worldbank_summary.htm). Abril 2004
- 18 Ngai T and Walewijk S. The Arsenic Biosand Filter (ABF) Project: Design of an Appropriate Household Drinking Water Filter for Rural Nepal. Rural Water Supply and Sanitation Support Programme (RWSSP), Butwal, Nepal and Environment and Public Health Organization (ENPHO), Kathmandu, Nepal. 2003
- 19 Ngai, T, Dangol B and Murcott, S. Construction, Installation, Operation, and Troubleshooting of KANCHANTM Arsenic Filter KAF) Gem505 Version. 2006

- 20 Ngai, T, Dangol B, Murcott S and Shrestha, R.R. KANCHAN Arsenic Filter. Massachusetts Institute of Technology (MIT) and Environment and Public Health Organization (ENPHO). Kathmandu, Nepal. 2006
- 21 OMS. CONSEJO EJECUTIVO, 118ª reunión 24 de mayo de 2006, Punto 5.4 del orden del día provisional. Mitigación de los efectos del arsénico presente en las aguas subterráneas. Informe de la Secretaría.
- 22 Orozco J, Duindam P y Heide R, Procesos y Operaciones Unitarias Tomos I Teoría”. TU Delft (Delft University of Technology). 1992
- 23 Orozco J, Duindam P y Heide R, Procesos y Operaciones Unitarias Tomo I Guías Prácticas”. TU Delft (Delft University of Technology). 1992
- 24 Pérez-Parra JA. Manual de Potabilización del Agua. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 1986
- 25 PIDMA – UNI, Muestro de arsénico, plomo y flúor en aguas subterráneas en la región paralela al graben de Nicaragua. 2002
- 26 Romero-Rojas JA. Potabilización del Agua. 3ª edición, Editorial Alfaomega; México. 1999
- 27 Smedley PL and Kinniburgh DG. A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry. 2002
- 28 Simeonova V. P., Rivera-Huerta M. L., Piña-Soberanis M., Avilés-Flores M. y Pérez-Castrejón S. Evaluación de diversos minerales para la remoción de arsénico de agua para consumo humano. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006.
- 29 Swash P., Myanmar P. S. Field Evaluation of the Wagtech Arsenator. Royal School of Mines, Imperial College, London,UK, 2003. Disponible en <http://www.wagtech.co.uk>. Año de consulta: 2008.

- 30 Shrestha PK. Arsenic, iron and coliforms removal efficiency of household level. In partial fulfilment of the requirement for the degree of Master of Science in environmental engineering Biosand filters. Lalitpur, Nepal. 2004
- 31 Shrestha RR, Maskey A and Dahal BM An Overview of Arsenic Contamination and its Mitigation in Nepal Red Cross Society Areas. Drinking Water Quality Improvement Program (DWQIP), Kathmandu, Nepal. 2003
- 32 The National Academy of Sciences. Arsenic in drinking water. National Academy Press, Washington, 1999. <http://books.nap.edu/books/0309063337/html/1.html>
- 33 The Wagtech Arsenator® system is the lowest cost, most portable and accurate method for determining Arsenic in safe limits (WHO guide-lines 10 ppb/µgl). Disponible en <http://www.wagtech.co.uk> Julio 2009
- 34 Torres S. E. Remoción del arsénico del agua a nivel familiar. Estudio de caso: Argentina. Universidad de Chile. 2006.
- 35 Valle, C, Gestión y funcionamiento de los servicios de agua potable y saneamiento básico en el medio rural. (informe preparado con apoyo financiero de UNICEF) 2003
- 36 Van Dijk, J.C.; Oomen, J. Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo. IRC/OMS/CEPIS. Serie Documentos Técnicos No. 11 (1978).
- 37 Vu K. B., Kaminski M. D. y Nuñez L. Review of Arsenic Removal Technologies for Contaminated Groundwaters. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439 operated by The University of Chicago for the United States Department of Energy under Contract W-31-109-Eng-38. 2002

VII. ANEXOS

Anexo A – Resultados del análisis granulométrico de la arena.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
LABORATORIO DE MATERIALES Y SUELOS
"ING. JULIO PADILLA M."



Managua, 3 de Diciembre de 2009

INGENIERO
ROLANDO BENITO CASTILLO
Su Oficina

Estimado Ing. Castillo:

Adjunto a la presente le estoy haciendo entrega de resultados de laboratorio de una muestra de arena de cauce, procedente de Momotombo, municipio de La Paz Centro, departamento de León.

Cabe mencionar que a la muestra suministrada, se le realizaron los ensayos siguientes, cuyos resultados se presentan en hoja adjunta:

- Gravedad específica.
- Absorción.
- Granulometría.

También se presentan los resultados de porosidad, curva granulométrica conteniendo D60, D30 y D10, así como los coeficientes de uniformidad (Cu) y de Curvatura (Cc).

Esperando que el presente informe satisfaga los requerimientos de su empresa, me despido.

Atentamente.



Ing. Marvin Blanco Rodriguez
Responsable
Laboratorio de Materiales y Suelos - UNI

c.c.: Archivo.

Elaborado por: Ing. Marvin Blanco Rodriguez Responsable Lab. Mat. y Suelos-UNI
Teléfono Celular: 888 72 675

RESULTADOS DE ENSAYE GRANULOMÉTRICO

MATERIAL ENSAYADO: ARENA DE CAUCE

PROCEDENCIA: "Momotombo, La Paz Centro"

Tamiz N°	Peso Retenido Parcial (gr)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	% Que Pasa
N°16	0.5	0	0	100
N°30	129.5	26	26	74
N°50	300.0	60	86	14
N°100	54.5	11	97	3
N°200	15.5	3	100	0
Pasa N° 200	0.0			
Total	500.0	100		



Elaborado por: Ing. Marvin Blanco Rodríguez

Responsable Lab. Mat. y Suelos-UNI

Teléfono Celular: 888 72 675

RESULTADOS DE LABORATORIO

MATERIAL ENSAYADO: ARENA DE CAUCE

PROCEDENCIA: "Momotombo, La Paz Centro"

ANALISIS GRANULOMETRICO

Tamiz N°	% Que Pasa
N°16	100
N°30	74
N°50	14
N°100	3
N°200	0

Módulo de Finura : 2.11

Gravedad Específica: 2.61

% Absorción : 2.81 %

Porosidad (n) : 0.068 = 6.8%

Relación de Vacíos (e) : 0.073

Diámetro Efectivo : 0.23 mm

Coefficiente de Uniformidad : 2.22

Coefficiente de Curvatura : 1.54



Elaborado por: Ing. Marvin Blanco Rodríguez

Responsable Lab. Mat. y Suelos-UNI

Teléfono Celular: 888 72 675



Anexo B – Análisis físico químico del agua en estudio.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
LABORATORIO AMBIENTAL



CERTIFICADO DE ANALISIS						
EMPRESA/PROYECTO		UBICACIÓN (Calle, Municipio, Provincia, Departamento)			REGION	
Proyecto Ambiental		Comunidad Linda Vista, Santa Rosa del Peñón, Mira La India				
OTRO DATOS		COMUNIDAD Santa Rosa del Peñón, Departamento E. Morón			TELEFONO	
FECHA DE INICIO/TERMINO DE MUESTREO EN EL LABORATORIO		FECHA DE ENTREGA DE CERTIFICADO DE ANALISIS		FECHA DE RECIBO	NOMBRE DE RECIBO	
09/12/2008		12/12/2008		09/01/2009	Jose C.	
NOMBRE DE MUESTRA				LABORATORIO DE ANALISIS EN LA UNO		
Agua Subterránea						
Fecha de Muestreo		09/12/2008 12:00 pm		09/12/2008 11:18 a.m	09/12/2008 01:19 p.m	Valor Limite
Muestreado por		Ing. Ricardo Cárdeno		Ing. César Muñoz	Ing. José Arango	
Fuente		Pozo Público		Pozo Privado	Pozo Privado	
Codificación Cliente		Francia Vento		Francia Rigo	Francia Arango	Permisible
Observaciones de Ubicación		Linda Vista, Loma		Santa Rosa del Peñón, Loma	Mira La India, Loma	
Codificación CIEMA		LA-01-281		LA-01-282	LA-01-283	
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION			NORMA #
	Aspecto	**	Muestra 1	Muestra 2	Muestra3	
Visual	Visual	*	Clara	Clara	Clara	NI
4500-B	Potencial de Hidrógeno	pH	7.89	8.89	7.29	6.5 - 8.5
2510-B	Conductividad Eléctrica	µS/cm	2340.00	823.00	891.00	400
2130-B	Turbiedad	NTU	0.04	0.08	0.05	5
2120-C	Color Verdadero	UC	<1.0	<1.0	<1.5	15
2320-B	Alcalinidad	mg/l	157.40	222.00	355.40	NI
2320-B	Carbonatos	mg/l	0.00	0.00	0.00	NI
2320-B	Bicarbonatos	mg/l	157.40	222.00	355.40	NI
4500-D	Nitratos	mg/l	0.42	11.10	6.67	50
4500-B	Nitritos	mg/l	<0.009	<0.009	<0.009	0.1
4500-D	Cloruros	mg/l	15.40	36.30	61.20	250
3500-B	Hierro Total	mg/l	5.143	0.106	0.050	0.3
4500-D	Sulfatos	mg/l	968.00	34.40	49.00	250
2340-C	Dureza total	mg/l	237.76	239.68	331.12	400
2340-C	Dureza Cálcica	mg/l	234.15	181.20	253.76	NI
3500-B	Calcio	mg/l	33.85	72.63	102.00	100
3500-B	Magnesio	mg/l	0.87	19.21	18.80	30
3500-B	Manganeso	mg/l	0.02	<0.02	<0.02	0.5
3500-X	Sodio	mg/l	432.00	12.00	50.00	200
3500-C	Potasio	mg/l	1.77	2.15	2.27	50
4500-C	Fluor	mg/l	1.27	0.24	0.24	0.7
2540-B	Sólidos Totales	mg/l	1520.00	493.00	630.00	NI
2540-C	Sólidos Totales Disueltos	mg/l	1497.00	481.00	616.00	1000
4500-C	Fósforo Total	mg/l	0.10	0.20	0.30	NI

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y error respectivo
* = menor al Limite de Detección que se especifica por parámetro. NE = No especificada por la Norma. NR = No Reporta
Métodos internacionales empleados: SM = Standard Methods, 20th-1998. EPA = Environmental Protection Agency
Valor Limite Permisible en la Norma CHRE

Ricardo Antonio Ramírez
Ingeniero, Lab. F-12 Agua y Medio Ambiente

José Ricardo Cárdeno
Ingeniero Técnico, Laboratorio Ambiental

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad y propiedad del informe.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
LABORATORIO AMBIENTAL



CERTIFICADO DE ANALISIS

FQAN-174

EMPRESA / PROYECTO / PERSONA		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Comunidad, Departamento		TELÉFONO	
NICARAGUA SUGAR ESTATES LIMITED		CHICHIGALPA, CHINANDEGA		23431013	
ATENCIÓN:		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Comunidad, Departamento, E-Mail		TELÉFONO	
Ing. Ivette Reyes Flores				2278-3930	
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO		FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS		CADENA DE CUSTODIA	
INGRESO	INICIO DE ANALISIS	FINAL DE ANALISIS			NÚMERO DE MUESTRAS
09/10/2009	12/10/2009	12/10/2009	15/10/2009	67	dos (2)
TIPO DE MUESTRA			SUPERVISOR DE MUESTREO EN CAMPO		
Agua Subterránea			Ing. Rolando B. Castillo		
Fecha de Muestreo		9/10/2009, 12:30 m		9/10/2009, 1:20 p.m	
Muestreado por		Ing. Rolando Castillo		Ing. Rolando Castillo	
Fuente		Comunidad Linda vista Santa Rosa del Peñon		Comunidad Mina la India Santa Rosa del Peñon	
Codificación Cliente		FQ-09-204		FQ-09-205	
Observaciones de Ubicación		León		León	
Codificación CIEMA		LA-0910-180		LA-0910-161	
METODO	ENSAYO REALIZADO	Unidad	VALOR DE CONCENTRACION		Valor Limite Permisible NORMA #
SM // EPA	PARAMETRO *	**	Muestra 1	Muestra 2	
Visual	Aspecto	*	Clara	Turbia	
3500-B	Hierro Total	mg/l	0,050	0,078	0,3
4500-E	Fósforo Total	mg/l	0,080	0,270	NE

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva
« = menor al Limite de Detección que se especifica por parámetro. NE = No especificada por la Norma. NR = No Reporta
Metodos Internacionales empleados: SM = Standard Methods, 20th 1998. EPA = Environmental Protection Agency
= Valor Limite Permisible en la Norma. CAPRE



[Firma]
Lic. Francisco Antonio Ramirez
Resp. Lab. F-Q Aguas Naturales

[Firma]
Mac Lic. Roberto Dávila
Coordinador Técnico Laboratorios Ambientales

[Firma]
Copia de Autorización
Laboratorios Ambientales CIEMA-UNI
Supervisado por el Centro de Calidad

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente, el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad e imparcialidad del informe.

Anexo C – Resultados experimentales del SONO filter y KANCHAN.

REMOCION DE ARSENICO - PRIMER CICLO

SONO filter ----- 5 kgs de clavos de hierro

No	Volumen		Tasa de Filtración (L/h)	Concentración de Arsénico			pH		Turbiedad		Potencial Redox		Conductividad Eléctrica		Temperatura		
	Agua Filtrada	Acumulado		Entrada	Salida	Remoción			Entrada	Salida			Entrada	Salida	Entrada	Salida	
	Litros			µg/L	µg/L	%	Entrada	Salida	NTU	Entrada	Salida	µS/cm		°C			
	Instalación del filtro																
	Cloración																
	10	10		78													
1	10	20	25.0	78	51	27	34.6										
2	10	30	25.0	78	47	31	39.7										
3	10	40	22.2	78	50	28	35.9										
4	10	50	11.8	78	41	37	47.4										
				80				7.6		0.08		430		1,800		30.0	
5	10	60	9.5	80	46	34	42.5	8.0		2.30		515		1,907		25.6	
6	10	70	25.0	80	37	43	53.8	8.3		2.10		495		1,929		26.0	
7	10	80	14.0	80	36	44	55.0	8.5		1.95		420		1,900		26.2	
8	10	90	19.4	80	49	31	38.8	8.0		1.70		512		1,906		26.1	
9	10	100	10.5	80	33	47	58.8	8.3		0.90		480		1,952		25.8	
				80				7.7		0.65		450		1,950		30.0	
10	10	110	21.4	80	32	48	60.0	7.9		1.20		440		2,000		26.8	
11	10	120	22.2	80	43	37	46.3	8.0		0.80		432		2,180		26.7	
12	10	130	20.0	80	33	47	58.8	8.1		0.67		428		1,900		26.3	
13	10	140	24.0	80	50	30	37.5	8.2		0.35		410		1,850		26.6	
14	10	150	28.6	80	45	35	43.8	8.0		0.50		437		1,920		26.8	
				61				7.4		0.07		420		2,010		31.0	
15	10	160	21.4	61	29	32	52.5	8.2		2.30		520		2,100		26.3	
16	10	170	20.7	61	45	16	26.2	8.2		2.70		480		2,050		26.5	
17	10	180	19.4	61	43	18	29.5	8.3		0.50		490		2,010		26.4	
18	10	190	18.2	61	24	37	60.7	8.2		0.20		510		1,982		26.7	
19	10	200	23.1	61	45	16	26.2	8.1		0.13		495		1,940		26.0	
				77				7.5		0.05		450		1,900		30.9	
20	10	210	16.7	77	58	19	24.7	8.2		3.90		498		2,090		25.1	
21	10	220	16.7	77	50	27	35.1	8.1		3.11		500		1,672		25.0	
22	10	230	14.0	77	23	54	70.1	7.7		3.90		450		660		25.0	
23	10	240	20.0	77	27	50	64.9	8.2		4.61		497		2,200		25.0	
24	10	250	15.4	77	43	34	44.2	8.2		3.84		507		2,200		25.0	
25	10	260	16.2	77	50	27	35.1	8.1		0.10		510		1,627		25.0	
				80				7.9		0.06		488		1,849		30.3	
26	10	270	16.2	80	28	52	65.0	8.2		2.69		464		1,786		23.0	
27	10	280	16.7	80	48	32	40.0	8.2		2.30		512		1,843		22.9	
28	10	290	15.8	80	36	44	55.0	8.1		0.16		515		1,895		23.0	
29	10	300	16.7	80	59	21	26.3	8.1		0.17		520		1,922		23.6	
				79				7.6		0.06		349		1,850		30.2	
30	10	310	15.8	79	56	23	29.1	8.1		2.43		408		2,050		23.6	
31	10	320	12.9	79	20	59	74.7	7.9		0.34		470		2,060		23.6	
Total Agua Filtrada		320															
Promedio		10	18.5	76	41	35	46.1	7.6	8.1	0.16	1.70	431	478	1,893	1,909	30.4	25.4

REMOCION DE ARSENICO - PRIMER CICLO
FILTRO KANCHAN ----- 5 kgs de clavos de hierro

No	Volumen		Tasa de Filtración (L/h)	Concetración de Arsenico				pH		Turbiedad		Potencial Redox		Conductividad Electrica		Temperatura	
	Agua Filtrada	Acumulado		Entrada	Salida	Remoción	Entrada			Salida	Entrada			Salida	Entrada	Salida	Entrada
	Litros			µg/L		µg/L	%	Entrada	Salida	NTU	Entrada	Salida	µS/cm		°C		
	<u>Instalación del filtro</u>																
	<u>Cloración</u>																
	10	10		78													
1	10	20	13.0	78	8	70	89.7										
2	10	30	11.4	78	8	70	89.7										
3	10	40	10.9	78	8	70	89.7										
4	10	50	11.5	78	6	72	92.3										
				80				7.6		0.62		430		1,800		30.0	
5	10	60	10.0	80	7	73	91.3		7.8	0.06		470		1,870		25.4	
6	10	70	10.9	80	6	74	92.5		8.0	0.10		510		1,869		25.7	
7	10	80	9.2	80	6	74	92.5		7.6	0.07		513		1,860		26.2	
8	10	90	9.6	80	8	72	90.0		7.7	0.08		480		1,877		25.1	
				80				7.7		0.64		442		1,950		30.0	
9	10	100	7.2	80	2	78	97.5		7.9	0.03		522		2,045		26.4	
10	10	110	11.3	80	2	78	97.5		7.7	0.12		402		2,010		26.6	
11	10	120	9.6	80	2	78	97.5		7.9	0.09		409		2,080		26.1	
12	10	130	5.3	80	2	78	97.5		7.8	0.87		403		2,000		26.0	
13	10	140	11.7	80	2	78	97.5		7.9	0.52		396		2,050		26.2	
				61				7.4		0.42		460		1,890		31.0	
14	10	150	8.2	61	2	59	96.7		7.8	0.04		460		2,010		25.0	
15	10	160	9.8	61	2	59	96.7		7.7	0.09		520		2,080		24.0	
16	10	170	8.4	61	2	59	96.7		7.8	0.06		496		2,050		24.5	
17	10	180	8.4	61	2	59	96.7		7.8	0.04		508		1,990		26.7	
18	10	190	8.4	61	2	59	96.7		7.7	0.10		210		1,860		26.0	
				77				7.5		0.08		450		1,900		30.9	
19	10	200	7.1	77	2	75	97.4		8.0	0.05		450		1,999		25.3	
20	10	210	8.6	77	2	75	97.4		8.2	0.06		460		1,800		24.0	
21	10	220	8.4	77	2	75	97.4		7.7	0.09		520		2,100		25.0	
22	10	230	9.2	77	2	75	97.4		7.9	0.09		496		2,100		25.0	
23	10	240	9.1	77	5	72	93.5		7.8	0.04		508		2,140		25.0	
24	10	250	5.5	77	3	74	96.1		8.1	0.10		210		1,627		25.0	
				80				7.9		0.08		488		1,849		30.3	
25	10	260	11.0	80	2	78	97.5		7.9	0.07		470		1,917		23.0	
26	10	270	9.5	80	2	78	97.5		7.9	0.07		515		1,815		22.7	
27	10	280	9.1	80	2	78	97.5		7.9	0.06		517		1,795		23.0	
28	10	290	9.1	80	2	78	97.5		7.8	0.07		520		1,885		22.4	
				79				7.6		0.09		349		1,850		31.1	
29	10	300	7.9	79	2	77	97.5		7.8	0.06		406		1,875		23.4	
30	10	310	8.6	79	2	77	97.5		7.6	0.10		467		2,000		23.5	
31	10	320	9.5	79	2	77	97.5		8.0	0.07		462		2,060		23.0	
32	10	330	8.7	79	2	77	97.5		7.7	0.08		425		1,961		24.0	
				79				7.8		0.06		549		2,050		30.6	
33	10	340	10.5	79	2	77	97.5		8.0	0.05		564		2,160		23.5	
34	10	350	9.0	79	2	77	97.5		7.8	0.07		461		1,955		23.5	
35	10	360	8.2	79	2	77	97.5		7.9	0.05		481		1,915		25.6	
36	10	370	7.7	79	2	77	97.5		8.0	0.04		483		2,080		24.2	
				80				7.7		0.59		452		1,900		29.9	
37	10	380	5.4	80	2	78	97.5		7.9	0.08		524		2,110		22.6	
38	10	390	11.8	80	5	75	93.8		7.8	0.05		403		2,051		24.2	
39	10	400	11.8	80	2	78	97.5		7.8	0.05		410		2,003		24.1	
40	10	410	12.5	80	2	78	97.5		7.8	0.04		404		2,050		24.3	
41	10	420	12.5	80	2	78	97.5		7.7	0.05		396		2,100		24.3	
Total Agua Filtrada		420															
Promedio		10	9.4	77.1	3.2	73.9	95.9	7.64	7.83	0.32	0.10	452	455	1,899	1,977	30.5	24.6

REMOCION DE ARSENICO - TERCER CICLO
FILTRO KANCHAN ----- 5 kgs de clavos de hierro

No	Volumen		Tasa de Filtración (L/h)	Concetración de Arsenico				pH		Turbiedad		Potencial Redox		Conductividad Electrica		Temperatura	
	Agua Filtrada	Acumulado		Entrada	Salida	Remoción	Entrada			Salida	Entrada			Salida	Entrada	Salida	Entrada
	Litros			µg/L	µg/L	%	Entrada	Salida	NTU	Entrada	Salida	µS/cm		°C			
	<u>Instalación del filtro</u>																
	<u>Cloración</u>																
				80				7.9		0.06		488		1,849		30.3	
1	30	30	7.6	80	2	78	97.5	7.9	7.9	0.07	0.07	470		1,917		23.0	
2	30	60	8.4	80	2	78	97.5	8.0	8.0	0.07	0.07	515		1,815		22.7	
3	30	90	7.7	80	2	78	97.5	7.9	7.9	0.06	0.06	517		1,795		23.0	
4	30	120	9.2	80	2	78	97.5	7.9	7.9	0.07	0.07	520		1,885		22.4	
				79				7.6		0.09		349		1,850		31.1	
5	30	150	8.3	79	2	77	97.5	7.8	7.8	0.06	0.06	406		1,875		23.4	
6	30	180	8.1	79	2	77	97.5	7.6	7.6	0.10	0.10	467		2,000		23.5	
7	30	210	7.7	79	2	77	97.5	7.6	7.6	0.07	0.07	462		2,060		23.0	
8	30	240	8.6	79	2	77	97.5	7.7	7.7	0.08	0.08	425		1,961		24.0	
				79				7.8		0.06		549		2,050		30.6	
9	30	270	9.6	79	2	77	97.5	7.7	7.7	0.05	0.05	564		2,160		23.5	
10	30	300	8.1	79	4	75	94.9	7.8	7.8	0.07	0.07	461		1,955		23.5	
11	30	330	8.8	79	3	76	96.2	8.0	8.0	0.05	0.05	481		1,915		25.6	
12	30	360	7.5	79	2	77	97.5	8.0	8.0	0.04	0.04	483		2,080		24.2	
				80				7.7		0.70		452		1,900		29.9	
13	30	390	11.8	80	2	78	97.5	7.9	7.9	0.08	0.08	524		2,110		22.6	
14	30	420	11.6	80	2	78	97.5	7.8	7.8	0.05	0.05	403		2,051		24.2	
15	30	450	11.5	80	3	77	96.3	7.8	7.8	0.05	0.05	410		2,003		24.1	
16	30	480	13.5	80	4	76	95.0	7.8	7.8	0.04	0.04	404		2,050		24.3	
17	30	510	13.3	80	3	77	96.3	7.7	7.7	0.05	0.05	396		2,100		24.3	
Total Agua Filtrada		510															
Promedio		30	9.5	79.5	2.4	77.1	97.0	7.7	7.8	0.23	0.06	459	465	1,912	1,984	30.5	23.6

REMOCION DE ARSENICO - SEGUNDO CICLO
FILTRO KANCHAN ----- 5 kgs de clavos de hierro

No	Volumen		Tasa de Filtración (L/h)	Concetración de Arsenico			pH		Turbiedad		Potencial Redox		Conductividad Electrica		Temperatura		
	Agua Filtrada	Acumulado		Entrada	Salida	Remoción			Entrada	Salida			Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada
	Litros			µg/L	µg/L	%	Entrada	Salida	NTU		Entrada	Salida	µS/cm		°C		
	<u>Instalación del filtro</u>																
	<u>Cloración</u>																
				80			7.9		0.06		488		1,849		30.3		
1	20	20	10.9	80	2	78	97.5	7.9		0.07		470		1,917		23.0	
2	20	40	10.3	80	2	78	97.5	8.0		0.07		515		1,815		22.7	
3	20	60	10.5	80	2	78	97.5	7.9		0.06		517		1,795		23.0	
4	20	80	12.0	80	2	78	97.5	7.9		0.07		520		1,885		22.4	
				79				7.6		0.09		349		1,850		31.1	
5	20	100	10.7	79	2	77	97.5	7.8		0.06		406		1,875		23.4	
6	20	120	10.2	79	2	77	97.5	7.6		0.10		467		2,000		23.5	
7	20	140	8.3	79	2	77	97.5	7.6		0.07		462		2,060		23.0	
8	20	160	9.5	79	2	77	97.5	7.7		0.08		425		1,961		24.0	
				79				7.8		0.06		549		2,050		30.6	
9	20	180	12.0	79	2	77	97.5	7.7		0.05		564		2,160		23.5	
10	20	200	10.9	79	2	77	97.5	7.8		0.07		461		1,955		23.5	
11	20	220	8.8	79	3	76	96.2	8.0		0.05		481		1,915		25.6	
12	20	240	8.3	79	2	77	97.5	8.0		0.04		483		2,080		24.2	
				80				7.7		0.59		452		1,900		29.9	
13	20	260	8.6	80	2	78	97.5	7.9		0.08		524		2,110		22.6	
14	20	280	15.0	80	3	77	96.3	7.8		0.05		403		2,051		24.2	
15	20	300	12.5	80	2	78	97.5	7.8		0.05		410		2,003		24.1	
16	20	320	15.8	80	2	78	97.5	7.8		0.04		404		2,050		24.3	
17	20	340	13.3	80	4	76	95.0	7.7		0.05		396		2,100		24.3	
Total Agua Filtrada		340															
Promedio		20	11.0	79.5	2.2	77.3	97.2	7.7	7.8	0.20	0.06	459	465	1,912	1,984	30.5	23.6

Anexo D – Análisis de hierro total agua filtrada - Filtro KANCHAN.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE
LABORATORIO AMBIENTAL



CERTIFICADO DE ANALISIS

EMPRESA / PROYECTO /		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Cantón/Provincia, Departamento		TELÉFONO
Proyecto Arsenico		DIRECCIÓN: Calle, Municipio, Cantón/Provincia, Departamento: C/Val		TELÉFONO
FECHAS DE PROCESAMIENTO DE MUESTRA EN EL LABORATORIO				
INGRESO:	SICIO DE ANALISIS:	FINAL DE ANALISIS:	FECHA DE EMISIÓN DE CERTIFICADO DE ANALISIS:	PROPORCIÓN NÚMERO
22/01/2009	23/01/2009	23/01/2009	13/03/2009	NÚMERO DE MUESTRAS tre (3)
TIPO DE MUESTRA: Agua Filtrada			SUPERVISOR DE MUESTREO EN CAMPO	

Fecha de Muestreo		22/01/2009		Valor Límite Permisible NORMA #
Muestreado por		Lic. Francisco A. Ramirez		
Fuente		Grifos y Tanques		
Codificación Cliente		NR		
Observaciones de Ubicación		80 mts. Al este Astro Cantón		
Codificación CIEMA		LA-0501-02		
METODO SM // EPA	ENSAYO REALIZADO PARAMETRO	Unidad **	VALOR DE CONCENTRACION Muestras	
3500-B	Hierro Total (Rolando)	mg/l	0,041	0,3
3500-B	Hierro Total (Ariel)	mg/l	0,143	0,3
3500-B	Hierro Total (Grela)	mg/l	0,373	0,3

LEYENDA DE REPORTE DE RESULTADOS: Se reporta por parámetro de acuerdo a la Unidad que se indica en la columna y línea respectiva.

< = menor al Límite de Detección que se especifica por parámetro. NE = No especificado por la Norma. NR = No Reporte

Métodos Internacionales empleados: SM = Standard Methods, 20th. 1998. EPA = Environmental Protection Agency

= Valor Límite Permisible en la Norma: CAPRE


Lic. Francisco A. Ramirez
Responsable F.O. Analistas


Coordinador Técnico de Laboratorio
Ambiental

Declaramos que este informe de resultados será de uso exclusivo del cliente; el laboratorio se reserva los derechos de confidencialidad y propiedad del informe.

Anexo E – Galería de fotos.



Foto 1 Pozo perforado equipado con bomba de mecate, situado en la comunidad de Linda Vista municipio de Santa Rosa del Peñón



Foto 2 Filtro SONO modificado, instalado en el laboratorio del CIEMA - UNI



Foto 3 Recolección de agua tratada del filtro KANCHAN instalado en el laboratorio del CIENA – UNI



Foto 4 Clavos de hierro < 20 mm, previamente oxidados



Foto 5 Lodos retenidos en el medio filtrante filtros KANCHAN



Foto 6 Agua recolectado del filtro KANCHAN

Anexo F – Presupuesto y planos constructivos SONO filter y KANCHAN

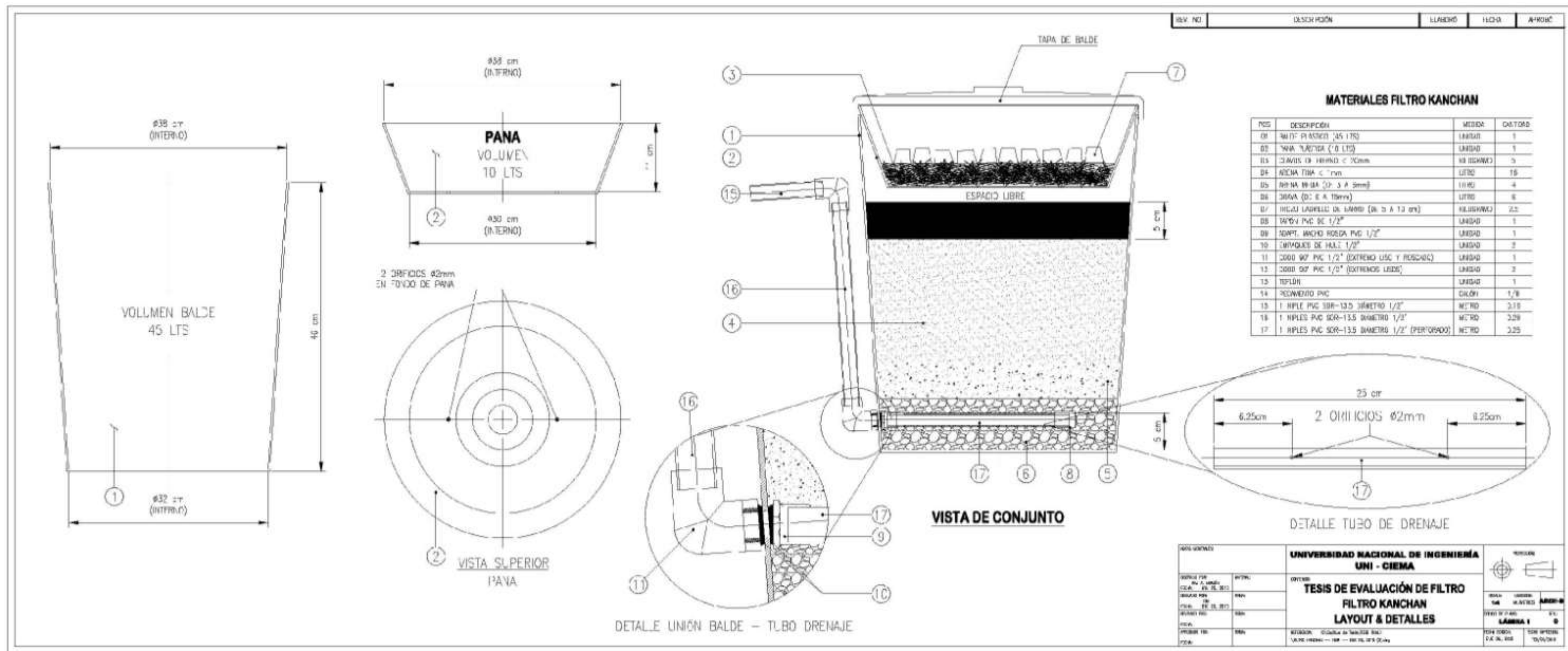
PRESUPUESTO GENERAL

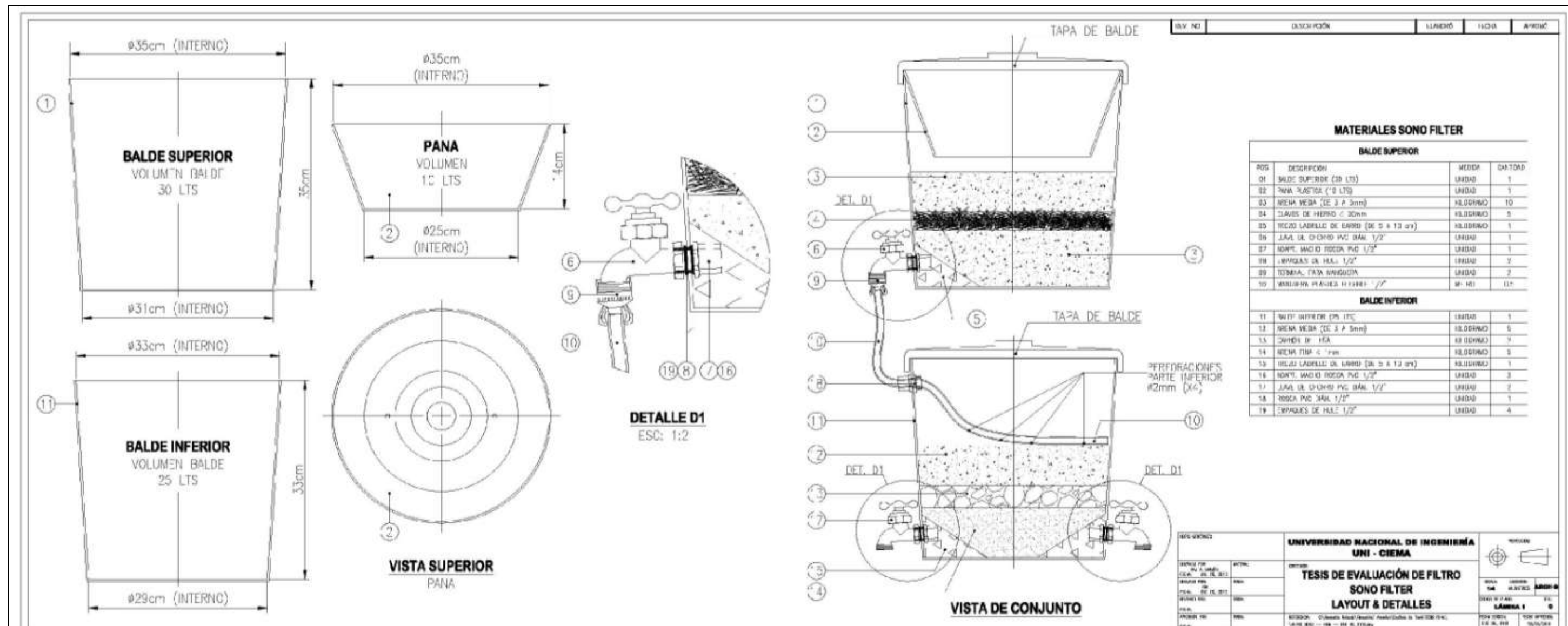
FILTRO KANCHAN

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Costos	
			Unitario (C\$)	Total (C\$)
Kanchan Arsenic Filter				431.88
Balde Plástico (45 lts)	Unid	1.00	80.00	80.00
Pana plástica (12.5lts)	Unid	1.00	25.00	25.00
Clavos de hierro < 20mm	kg	5.00	41.80	209.00
Arena Fina < 1mm	lts	16.00	1.50	24.00
Arena Media (3 a 6mm)	lts	4.00	1.50	6.00
Grava (6 a 15 mm)	lts	6.00	1.50	9.00
Trozos ladrillos de barro (5 a 10cm)	Unid	3.00	2.00	6.00
Tubo PVC de 1/2" - SDR -13.5	mts	1.00	25.00	25.00
Tapón PVC 1/2"	Unid	1.00	5.00	5.00
Adap. Macho de rosca 1/2" PVC	Unid	1.00	5.00	5.00
Empaques de Hule 1/2"	Unid	3.00	2.00	6.00
Codos de 90° - PVC 1/2" (Extremo liso y roscado)	Unid	1.00	5.00	5.00
Codos de 90° - PVC 1/2" (Extremos lisos)	Unid	3.00	5.00	15.00
Teflón	Unid	1.00	10.00	10.00
Pegamento PVC (1/8 gln)	gln	0.13	15.00	1.88

FILTRO SONO MODIFICADO

Concepto	Unidad de Medida	Cantidad	Costos	
			Unitario (C\$)	Total (C\$)
Sono Filter				653.50
Recipiente - #1 (30 lts)				442.50
Balde Plástico (30 lts)	Unid	1.00	95.00	95.00
Pana Plástica (10 lts)	Unid	1.00	25.00	25.00
Clavos de hierro < 20mm	kg	5.00	41.80	209.00
Arena Media (3 a 6mm)	kg	10.00	1.50	15.00
Trozos ladrillos de barro (5 a 10cm)	kg	1.00	2.00	2.00
Llave de chorro de 1/2" PVC	Und	1.00	40.00	40.00
Rosca de 1/2" PVC	Und	1.00	2.00	2.00
Empaques de Hule 1/2"	Unid	2.00	2.00	4.00
Manguera plástica flexible de 1/2"	mts	0.50	15.00	7.50
Terminales para mangueras	Und	2.00	20.00	40.00
Conector 1/2" PVC	Und	1.00	3.00	3.00
Recipiente - #2 (25 lts)				211.00
Balde Plástico (25 lts)	Unid	1.00	70.00	70.00
Arena Media (3 a 6mm)	kg	5.00	1.50	7.50
Arena Fina < 1mm	kg	5.00	1.50	7.50
Trozos ladrillos de barro (5 a 10cm)	kg	1.00	2.00	2.00
Carbón de leña	kg	2.00	15.00	30.00
Adap. Macho de rosca 1/2" PVC	Unid	2.00	5.00	10.00
Llave de chorro de 1/2" PVC	Und	2.00	40.00	80.00
Rosca de 1/2" PVC	Und	2.00	2.00	4.00





DATOS GENERALES		UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA UNI - CIEMA		PROYECTO	
DESARROLLADO POR	ALUMNO	TESIS DE EVALUACIÓN DE FILTRO SONO FILTER LAYOUT & DETALLES		FECHA	REVISADO
COORDINADO POR	PROF.			FECHA	REVISADO
PROYECTADO POR	PROF.			FECHA	REVISADO
PROYECTADO POR	PROF.			FECHA	REVISADO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA UNI - CIEMA	
TESIS DE EVALUACIÓN DE FILTRO SONO FILTER LAYOUT & DETALLES	LÁMINA 1 DE 1 A 1